

A Ventilação e o RSECE nas Escolas: Estudo de Impacto Energético e Estratégias de Mitigação

Rui Manuel Meira da Cruz Almeida

Relatório do Projecto Final

Orientador: Prof. Vítor Leal



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho 2008

Resumo

O presente trabalho surge no âmbito da cadeira de Projecto do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, e tem como objectivo o estudo do impacte energético decorrente da aplicação da nova regulamentação energética e da qualidade do ar interior (QAI) às Escolas, assim como de estratégias de mitigação desses mesmos impactes.

Para tal foram estudadas duas tipologias tidas como representativas do parque escolar nacional: uma Escola Primária (área: 352 m²) e um pavilhão de aulas (área: 1770 m²) de uma Escola Secundária, modeladas com o *software* de simulação térmica ESP-r.

Os resultados obtidos da simulação foram, numa primeira fase, as temperaturas em regime de flutuação livre (“free-floating”) com as taxas de ventilação actuais (baixas) e regulamentares (maiores) para, através do modelo de conforto adaptativo, analisar o grau de desconforto térmico e o aumento deste com o incremento da taxa de ventilação que as auditorias obrigatórias à qualidade do ar interior provavelmente virão a reclamar. Como esperado, os resultados confirmam que o aumento das taxas de ventilação tem efeitos negativos no conforto térmico de Inverno, pelo que é necessário recorrer a sistemas de aquecimento.

Numa segunda fase, assumindo a existência de um sistema de climatização para manter as condições de conforto (temperatura entre 20 e 25°C), foram calculadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento nominais e, tendo em conta sistemas convencionais, as necessidades de energia final e o seu custo.

Conclui-se que para garantia do conforto é a indispensável utilização de um sistema para aquecimento, ao passo que para o arrefecimento este pode ser poderá ser dispensado, uma vez que o tempo em desconforto nesta estação é baixo e são possíveis medidas passivas de mitigação, como o sombreamento exterior e o aumento da taxa de ventilação.

Por fim estudaram-se algumas medidas de mitigação aos prováveis consumos de energia – melhoria da envolvente, recuperação de calor e utilização de sistemas mais eficientes – sobretudo direccionadas às necessidades de aquecimento (preponderantes), podendo-se atingir poupanças energéticas significativas: considerando as medidas em simultâneo podem-se obter diminuições dos custos com energia de 70% para a Escola Primária e 65% para a Escola Secundária. Apesar disso, os períodos de retorno do investimento para algumas delas provaram a sua inviabilidade económica. Das medidas estudadas emergiu a opção por um sistema eficiente de produção de calor (caldeira de condensação ou bomba de calor) como sendo a medida com melhor retorno económico.

The Ventilation and the RSECE in Schools. Study of energetic impact and mitigation strategies

Abstract

This work was developed under the Project course of Master's degree in Mechanical Engineering of the Faculty of Engineering of University of Oporto. Its aims are to evaluate the energetic impact due to the application of new energetic and indoor air quality (IAQ) legislation to the Schools and to study some mitigation strategies of those same impacts.

For that propose two commons typologies of public's schools were studied: a Primary School (area: 352 m²) and a classroom building (area: 1770 m²) of a High School, modeled with the thermal simulation software ESP-r.

The first results of the simulation were the temperatures under free float regime with the current rates of ventilation (lowers) and the standard rates (bigger) in order to, through the adaptive comfort model, analyze the degree of thermal discomfort and its increase with the rise of the ventilation rates. As expected the results showed that the indoor thermal comfort in Winter may suffer with increased ventilation rates.

In a second phase, assuming the existence of a climatization system to maintain the comfort conditions (temperature between 20 and 25°C) the needs for heating and cooling were calculated. Moreover, taking into account the conventional systems, the needs of final energy and its costs were also determined.

The use of a heating system is indispensable, whereas a cooling one might not be necessary due to the small amount of time of discomfort in this season and also to the possible measures of mitigation as the external shading and increasing ventilation rates.

Finally some measures of mitigation were studied – heat recovery, improvement of the envelope (increase of insulation) and use of more efficient systems - particularly targeted to the needs of heating (preponderant). Significant energy savings are possible to be achieved: considering the measures in simultaneous, decreases of the costs of energy of 70% for the Primary and 65% for the High School could be obtained. In spite of that, the payback period for some of them proofed their economic unfeasibility. Of the studied measures the most effective was the adoption of a high efficiency systems for heat production (condensing boiler or heat pump).

Agradecimentos

Ao professor Eduardo Oliveira Fernandes agradeço a oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Vítor Leal uma palavra especial de gratidão pela enorme disponibilidade, paciência e qualidade na orientação deste trabalho.

À Engenheira Érica Marques da Efacec e à AlumiNeiva deixo aqui também o meu reconhecimento pelas contribuições prestadas.

Por fim, as ajudas indispensáveis de alguns colegas e amigos, sem as quais teria sido bem mais difícil chegar a bom porto.

Índice

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Contextualização: a nova regulamentação	1
1.2.	Os Regulamentos: SCE, RSECE e RCCTE	3
1.2.1.	Objectivos principais:.....	3
1.3.	Materialização dos requisitos para este trabalho	4
1.4.	A realidade das Escolas nacionais e as perspectivas de aplicação do RSECE.....	6
1.4.1.	Ventilação e Qualidade do Ar Interior	6
1.4.2.	Parque Escolar: estado de conservação.....	7
1.5.	Objectivos do trabalho.....	8
2.	CASOS DE ESTUDO	11
2.1.	Escola Primária.....	11
2.1.1.	Apresentação	11
2.1.2.	Caracterização térmica da envolvente.....	13
2.1.3.	Pontes Térmicas	15
2.1.4.	Ganhos Internos	16
2.1.5.	Condições de fronteira	17
2.1.6.	Taxa de renovação horária	17
2.1.7.	Eficiência de ventilação	17
2.1.8.	Resultados em “free-floating”	18
2.1.9.	Resultados com ambiente climatizado	22
2.1.9.1.	Situação actual: 0,6 RPH.....	22
2.1.9.2.	Caudais RSECE	23
2.1.10.	Mitigação.....	26
a)	Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,7 RPH.....	26
b)	Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,1 RPH.....	28
c)	Melhoria de envolvente	29
d)	Aumento da eficiência de ventilação	31
e)	Aumento da eficiência dos ventiladores (redução do SFP).....	32
f)	Utilização de sistemas de maior eficiência para as necessidades de aquecimento ..	32
g)	Melhoria integrada	33
2.1.11.	Resultados com ambiente climatizado para perfis do RSECE.....	34
2.1.12.	Resumo dos resultados e classificação energética	36
2.1.13.	Análise económica simplista das medidas anteriores	38

2.2.	Pavilhão de Escola Secundária	41
2.2.1.	Apresentação.....	41
2.2.2.	Caracterização térmica da envolvente	44
2.2.2.1.	Pontes térmicas	45
2.2.3.	Resultados em “free-floating”	46
2.2.4.	Resultados com ambiente climatizado.....	50
2.2.4.1.	Situação actual: 0,6 RPH	50
2.2.4.2.	Caudais RSECE.....	51
2.2.5.	Mitigação	54
a)	Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,7 RPH	54
b)	Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,1 RPH	54
c)	Melhoria de envolvente.....	56
d)	Aumento da eficiência de ventilação: 100% (valor ideal).....	58
e)	Aumento da eficiência dos ventiladores (redução do SFP)	59
f)	Utilização de sistemas de maior eficiência para as necessidades de aquecimento .	59
g)	Melhoria integrada.....	60
2.2.6.	Resumo dos resultados e classificação energética.....	61
2.2.7.	Análise económica simplista das medidas anteriores.....	62
3.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
4.	BIBLIOGRAFIA.....	67
	ANEXO A – Modelo Térmico do ESP-r	69
	ANEXO B – Perfis de ocupação, iluminação e equipamentos (RSECE).....	72
	ANEXO C – Cálculo do IEE (RSECE) e valores para a etiquetagem energética	73

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização: a nova regulamentação

Este trabalho surge no âmbito da aplicação do novo Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, doravante designado apenas pela sigla SCE, a um subgrupo de edifícios de serviços particular e especial – as Escolas – e das oportunidades e sobretudo dos desafios que daí surgem.

O SCE é o veículo instrumental instituído pelo Governo para promover a eficiência energética e garantir a qualidade do ar interior (QAI) dos edifícios em Portugal, procurando conciliar estas duas questões por vezes consideradas antagónicas. Juntamente com o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que contêm o suporte técnico para a sua aplicação, materializa a nova legislação nacional sobre esta matéria. Esta nova construção regulamentar traduz as preocupações com a eficiência energética (em linha com a União Europeia - UE) e com a QAI nos edifícios, seguindo recomendações internacionais, nomeadamente da Organização Mundial de Saúde (OMS), como de seguida se mostrará.

Eficiência energética

A escalada dos preços dos combustíveis fósseis, principalmente do petróleo, tem colocado o debate acerca dos custos da energia na ordem do dia. Há quem fale até de um terceiro choque petrolífero (Gordon Brown, Primeiro-Ministro Inglês, Maio 2008) e é assumido como certo que o período da energia barata chegou ao fim. Se juntarmos as preocupações de segurança energética, ambientais e de competitividade a eficiência energética surge como uma ferramenta cada vez mais incontornável, permitindo poupanças consideráveis, como parte de um novo paradigma energético.

Ao nível da UE existe a Directiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios, com o intuito de aumentar a eficiência energética e o conforto nos mesmos. A atenção dada aos edifícios resulta da sua importância crescente (em ritmo ainda maior em Portugal) como consumidores de energia e das enormes potenciais poupanças que podem ser conseguidas: os edifícios de serviços foram responsáveis, na União Europeia (UE) em 2002, por cerca 55% do consumo de electricidade e de 36% do consumo de energia primária. Também nesse ano, 78% da energia final foi obtida a partir de combustíveis fósseis, os quais são quase 80% importados (IEA, 2005). No entanto, mais de 50% deste consumo pode ser reduzido através de medidas eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ – quase a totalidade do compromisso da UE no âmbito do Protocolo de Quioto (ADENE, 2008).

Em Portugal, o consumo de energia primária tem registado um importante abrandamento nos últimos anos devido à desaceleração económica e ao aumento dos preços de petróleo. Portugal já entrou, finalmente, em convergência com a média europeia em termos de intensidade energética (figura 1). Não obstante, o consumo energético dos edifícios e o consumo eléctrico continuam a crescer acima da média europeia (figura 2), constituindo uma área prioritária de intervenção (Ministério Economia, 2007). Estes dois pontos indicam, claramente, um potencial elevado de poupança no sector dos serviços no País.

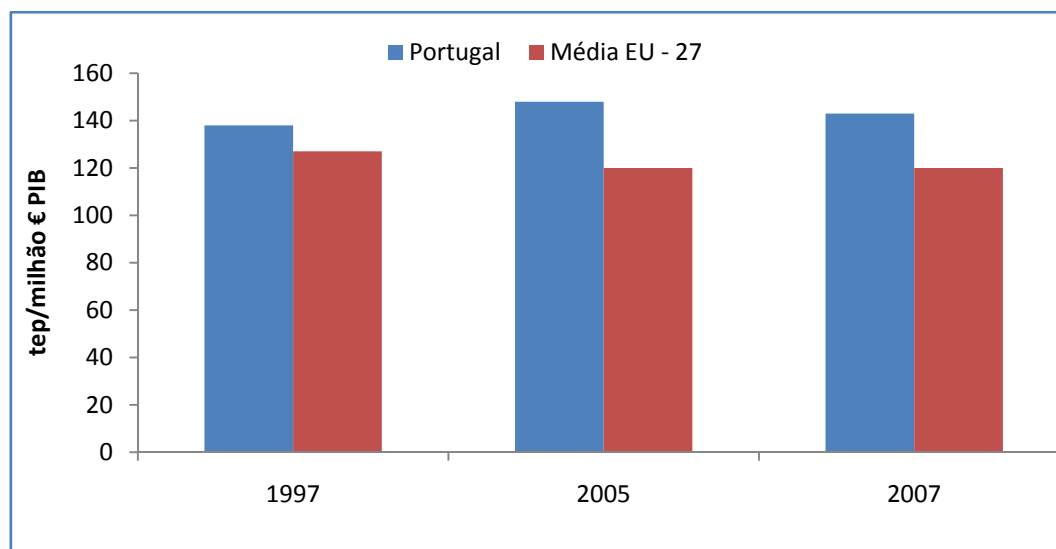


Figura 1 – Comparação da intensidade energética em Portugal e na Europa

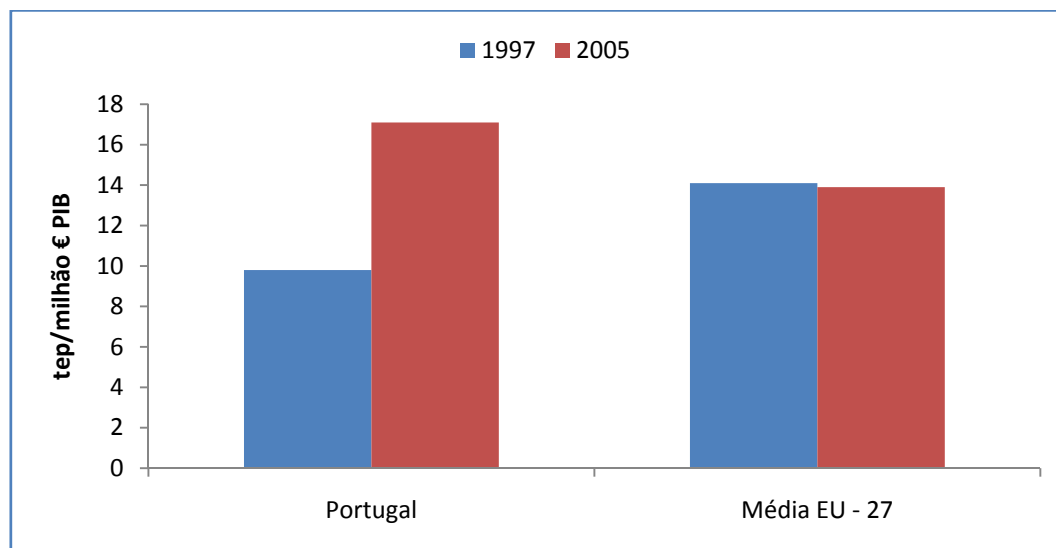


Figura 2 – Variação do peso dos Serviços para a intensidade energética (PNAEE, 2008)

Portugal é ainda um país com escassos recursos energéticos próprios, nomeadamente aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos (como o petróleo, o carvão e o gás). Tal situação de escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior (84,1% em 2006), nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil, provocando uma forte dependência estratégica e uma verdadeira sangria de recursos nacionais para os países produtores, agravado agora pela forte subida dos preços: “Portugal está a enfrentar um abanão petrolífero. Os gastos do país com o

crude deverão subir 30% este ano relativamente a 2007, superando os 4% do PIB, o valor mais alto desde 1985” (Diário Económico, Junho 2008).

A problemática da Qualidade do Ar Interior nas Escolas

Ao longo das últimas duas décadas tem-se verificado um interesse crescente da comunidade científica pelos efeitos da QAI na saúde e, consequentemente, na produtividade e no desempenho escolar (Silva, Gabriela et al., 2006). É patente, em vários artigos e estudos sobre o tema (Norback, D. et al., 2006), a baixa qualidade do ambiente interior das Escolas. A Organização Mundial de Saúde alertou, em 2003, para o facto: “o ambiente interior nas escolas é muitas vezes mais poluído que o exterior, contribuindo consideravelmente para o aumento da asma, infecções e de outras doenças do foro respiratório nas crianças”, considerando ainda a QAI como uma questão de saúde pública.

A escola é um local de permanência das crianças e adolescentes, (cerca de um terço do seu dia normal) onde se pretende o seu desenvolvimento. Para que este desenvolvimento seja saudável contribui, de forma significativa, uma boa qualidade ambiental do espaço “*escola*”. As estatísticas indicam que as doenças alérgicas nas crianças têm aumentado nos últimos anos e devem ser agora consideradas como as doenças crónicas mais frequentes (N. Aberg et al., 1996). Nos Estados Unidos, 15 a 20% da população sofre deste tipo de doenças e na maioria dos casos os primeiros sintomas surgiram durante a idade escolar (The American College of Allergy, Asthma & Immunology, 2002).

Estudos recentes revelam ainda que o absentismo é muitas vezes resultado da fraca qualidade do ar interior, associada a sintomas como a dor de cabeça, fadiga, falta de ar, tosse, espirros, irritação dos olhos e nariz ou tonturas (Parola, D. et al., 2004).

1.2. Os Regulamentos: SCE, RSECE e RCCTE

A apresentação destes regulamentos deve sempre ter em conta a interligação e subsidiariedade que existem entre eles. Como atrás referido, fazem parte de uma nova construção jurídica para assegurar o cumprimento de directivas europeias e promover a eficiência energética e a QAI. Em linhas gerais o SCE assegura a certificação energética de todos os edificios com base no normativo técnico do RCCTE, mais vocacionado para o parque residencial, ou no RSECE, mais vocacionado para o parque de serviços. De seguida são apresentados de forma mais sistemática os objectivos principais de cada um dos regulamentos.

1.2.1. Objectivos principais:

O SCE, instituído pelo Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, resulta da transposição parcial para a ordem jurídica nacional da Directiva 2002/91/CE e tem por objectivos (ADENE, 2008):

- Assegurar a aplicação regulamentar, nomeadamente no que respeita às condições de eficiência energética, à utilização de sistemas de energias renováveis e, ainda, às condições de garantia da QAI, de acordo com as exigências e disposições contidas no RCCTE e no RSECE;
- Certificar o desempenho energético e a QAI nos edificios;
- Identificar as medidas correctivas ou de melhoria de desempenho aplicáveis aos edificios e respectivos sistemas energéticos.

O **RSECE** (Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 Abril) estabelece:

- As condições a observar no projecto de novos sistemas de climatização, nomeadamente os requisitos em termos de conforto térmico e QAI;
- Os limites máximos de consumo de energia nos grandes edifícios de serviços existentes e para todo o edifício, em particular, para a climatização, previsíveis sob condições nominais de funcionamento para edifícios novos ou para grandes intervenções de reabilitação de edifícios existentes que venham a ter novos sistemas de climatização abrangidos pelo Regulamento, bem como os limites de potência aplicáveis aos sistemas de climatização a instalar nesses edifícios;
- Os termos de concepção, da instalação e do estabelecimento das condições de manutenção a que devem obedecer os sistemas de climatização;
- As condições de monitorização e de auditoria de funcionamento dos edifícios em termos dos consumos de energia e da qualidade do ar interior.

O **RCCTE** (Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 Abril), indica as regras a observar no projecto de todos os edifícios de habitação e dos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados de modo que:

- As exigências de conforto térmico, seja ele de aquecimento ou de arrefecimento, e de ventilação para garantia de qualidade do ar no interior dos edifícios, bem como as necessidades de água quente sanitária, possam vir a ser satisfeitas sem dispêndio excessivo de energia;
- Sejam verificados requisitos mínimos de qualidade da envolvente;
- Sejam minimizadas as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior.

1.3. Materialização dos requisitos para este trabalho

Os requisitos a verificar no âmbito dos novos regulamentos diferem de acordo com a tipologia do edifício. Para este trabalho, tendo em conta que as Escolas são edifícios de serviços, os requisitos mais importantes a considerar encontram-se no RSECE.

Neste Regulamento os requisitos são aplicáveis a edifícios novos e existentes aquando da emissão das licenças para construção e utilização e emissão de certificados após auditoria, na vertente “Energia” e “QAI”. Distinguem-se os requisitos:

- Energéticos, incluindo a limitação do consumo nominal específico de energia;
- Para concepção de novos sistemas de climatização;
- Para construção, ensaios e manutenção das instalações;
- Para a manutenção da QAI;
- Do SCE, nomeadamente a afixação de cópia do certificado válido, em local acessível e bem visível, junto à entrada.

Tabela 1 - Procedimentos e requisitos para os edifícios de serviços existentes

Edifícios Serviços Existentes	Procedimentos	Requisitos
Pequenos: Área < 1000 m²	Auditoria QAI	Qualidade do ar
Grandes: Área > 1000 m²	Auditoria Energética e QAI	Energéticos e Qualidade do ar

- **Requisitos energéticos:** calculados com base em perfis nominais de utilização de edifícios, traduzido num Indicador de Eficiência Energética (IEE)¹. Para as Escolas o valor limite do IEE é de 15 kgep/(m².ano). Em caso de grandes intervenções devem-se considerar ainda requisitos mínimos de qualidade da envolvente;
- **Requisitos para manutenção da QAI:** os edifícios devem ser dotados de meios naturais, mecânicos ou híbridos que garantam taxas de renovação de ar mínimas, conforme a tipologia. Para a “sala de aula” é necessário um caudal mínimo de 30 m³/(h.ocupante). Paralelamente existem também concentrações máximas admissíveis para poluentes comuns no interior dos edifícios (tabela 2). A taxa de ventilação anterior deve garantir que estes poluentes ficam abaixo das concentrações máximas. Caso se verifiquem, durante a auditoria de QAI, fontes internas ou externas deste tipo de poluentes, deve-se garantir que o sistema é capaz de incrementar as taxas de ventilação em 50%, ainda que apenas pontualmente.

Tabela 2 – Concentrações máximas de referência de poluentes

Parâmetros	Concentração máxima	Unidade
Partículas suspensas no ar (PM10)	0,15	mg/m3
Dióxido de carbono	1800	
Monóxido de carbono	12,5	
Ozono	0,2	
Formaldeído	0,1	
Compostos orgânicos voláteis totais	0,6	UFC/m3
Microrganismos: Bactérias e Fungos	500	
Legionella	100	
Radon2	400	Bq/m3

¹ Método de cálculo em Anexo

² De pesquisa obrigatório apenas em zonas graníticas, nomeadamente nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco.

O RSECE foi publicado em 2006 e estará completamente em vigor no início de 2009. Aplica-se integralmente às Escolas existentes sempre que estas tenham uma área útil superior a 1000 m², instalem sistemas de climatização com potência superior a 25 kW ou realizem grandes intervenções de reabilitação relacionadas com a envolvente, as instalações mecânicas de climatização ou os demais sistemas energéticos do edifício. No mesmo regulamento define-se “grande intervenção de reabilitação” como uma intervenção cujo custo seja superior a 25% do valor do edifício.

1.4. A realidade das Escolas nacionais e as perspectivas de aplicação do RSECE

1.4.1. Ventilação e Qualidade do Ar Interior

As Escolas são, na esmagadora maioria dos casos, ventiladas naturalmente e não possuem sistemas de climatização. Não existem muitos estudos em Portugal sobre a QAI nestes edifícios, mas é de assumir que aqui exista aproximadamente a mesma realidade referida atrás, em 1.1.

Um estudo realizado pelo Laboratório de Qualidade do Ar Interior (LQAI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) em oito escolas dos 2º e 3º ciclos, do concelho do Porto, (Silva, Gabriela et al., 2006) corrobora esta ideia: baixa QAI das escolas analisadas sobretudo durante o Inverno, em que as temperaturas exteriores convidam a um maior isolamento, nomeadamente com o fecho de portas e janelas. As taxas de renovação de ar são variáveis mas os valores obtidos são baixos, com um valor médio de 3 m³/(h.ocupante), ou seja, apenas 10% do valor regulamentar (figura 3). A excessiva concentração de alunos em muitas salas contribui para agravar o problema. O estudo conclui assim que o principal problema das escolas estudadas se prende com as baixas taxas de ventilação provocando, sobretudo, concentrações elevadas de CO₂ e de Compostos Orgânicos Voláteis (COV's).

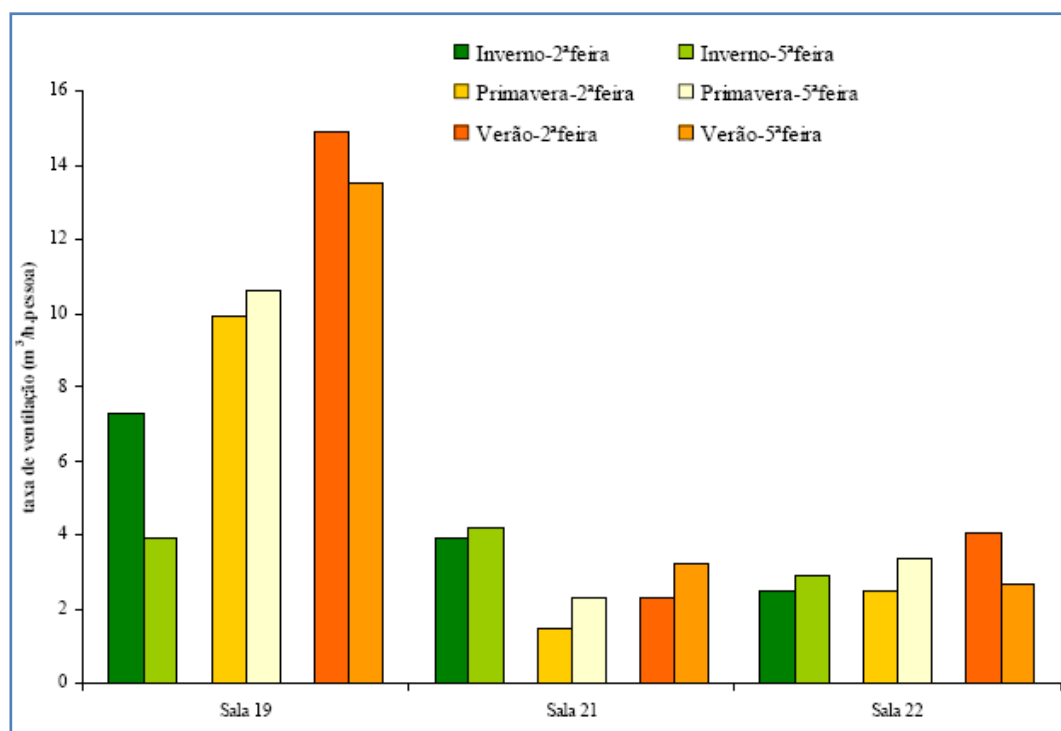


Figura 3 – Taxas de ventilação medidas em três salas no estudo do LQAI

1.4.2. Parque Escolar: estado de conservação

Segundo o Recenseamento Escolar 06/07 estavam inscritos nesse ano lectivo 1 450 073 alunos nas escolas públicas, num total de 10 972 estabelecimentos de ensino, desde os Jardins de Infância até às Escolas Secundárias.

É sabido também que a idade média do parque escolar é elevada, estando muitas escolas em estados de degradação mais ou menos acentuados. A existência de programas públicos de apoio à remodelação e reestruturação, e os números que apontam, ajudam a perceber melhor a dimensão do problema (Ministério da Educação, 2007):

- **Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário:** operacional desde 2007, para um total de 477 escolas com ensino secundário e/ou profissional tuteladas pelo Ministério da Educação, abrangerá 332 escolas até ao ano de 2015, tendo como principal objectivo a recuperação e modernização dos edifícios. O investimento total previsto ascende a 940 milhões de euros.
- **Programa de Requalificação da Rede Escolar do 1.º Ciclo do Ensino Básico e Pré-Escolar:** cria condições financeiras para que os municípios avancem com a resolução dos problemas ao nível da rede escolar, quer através da construção de novos centros escolares quer através da requalificação dos edifícios. O programa é financiado a 70% por fundos europeus, que significam cerca de 400 milhões de euros. O restante esforço deve ser feito pelas autarquias.

Estes são os dois programas mais importantes e globais que existem para a requalificação do parque escolar sendo de esperar que existam também outras iniciativas locais e pontuais. Assim, tendo em conta a dimensão do parque escolar e as necessidades de requalificação, e relembrando a obrigatoriedade de aplicação do SCE e do RSECE aos edifícios de serviços existentes sujeitos a “grandes requalificações da envolvente”, a acrescentar à aplicação aos edifícios com mais de 1000 m² ou com sistemas de climatização com mais de 25 kW de potência nominal, é de prever uma aplicação crescente dos dois regulamentos, com os requisitos que eles impõem. O que trará mais impacto é o referente à QAI, uma vez que as taxas de renovação existentes, devidas à ventilação natural, ficam muito aquém dos valores impostos, o que levará a que em muitas auditorias sejam detectadas concentrações de poluentes acima dos máximos admissíveis.

Assim será necessário recorrer à ventilação mecânica, que por sua vez terá certamente impactos no conforto térmico dos ocupantes o que implicará a utilização de sistemas de climatização, sobretudo na estação de aquecimento. Consequentemente serão necessários fortes investimentos iniciais e de operação com estes sistemas que, tendo em conta a falta de recursos do Sistema Educativo e a dimensão faraónica do parque escolar, podem-se tornar num fardo pesado e difícil de aguentar pelo Estado em geral e pelas Escolas em particular. Urge quantificar estes custos e estudar medidas de mitigação.

É deste contexto que surge a oportunidade e o interesse deste trabalho.

1.5. Objectivos do trabalho

Face ao exposto, neste trabalho procura-se analisar e quantificar os impactes resultantes da aplicação da nova regulamentação e ainda estudar algumas soluções de mitigação. As possibilidades são muitas e diversas, mas consideram-se as seguintes, tidas como comuns, ao nível do:

- Melhoramento das soluções da envolvente opaca e transparente:
 - Aumento do isolamento;
 - Aumento da estanquicidade.
- Recuperação de calor;
- Aumento da eficiência da ventilação;
- Utilização de sistemas de elevada eficiência;

A metodologia seguida no trabalho consiste, assim, no estudo de duas tipologias existentes de Escolas: uma com área bastante inferior a 1000 m², com a finalidade de representar uma tipologia de pequenas Escolas Primárias ainda comuns, sobretudo em zonas rurais; a segunda, um pavilhão de Escola Secundária, com área superior a 1000 m², representando o enorme universo da maioria das Escolas Básicas e Secundárias existentes.

Numa primeira fase pretende-se o retrato da situação actualmente vivida nestas Escolas, numa perspectiva do conforto térmico, partindo já do princípio que a QAI é baixa. De seguida verificar a alteração, ainda ao nível do conforto, quando se ventila mecanicamente os edifícios com os caudais regulamentares. Em princípio a situação será de desconforto, agravado para a segunda situação, nomeadamente na estação de aquecimento.

A segunda fase será a do cálculo das necessidades energéticas para climatização, de forma a manter as salas entre os 20 e os 25°C, e os respectivos consumos e custos da energia, utilizando sistemas convencionais para suprir a demanda da energia de aquecimento e arrefecimento.

A última fase consiste no estudo das referidas estratégias de mitigação dos consumos, obtendo-se as poupanças anuais e tentando-se ainda uma primeira aproximação a uma análise económica de cada medida.

Esta sequência está esquematizada na figura seguinte:

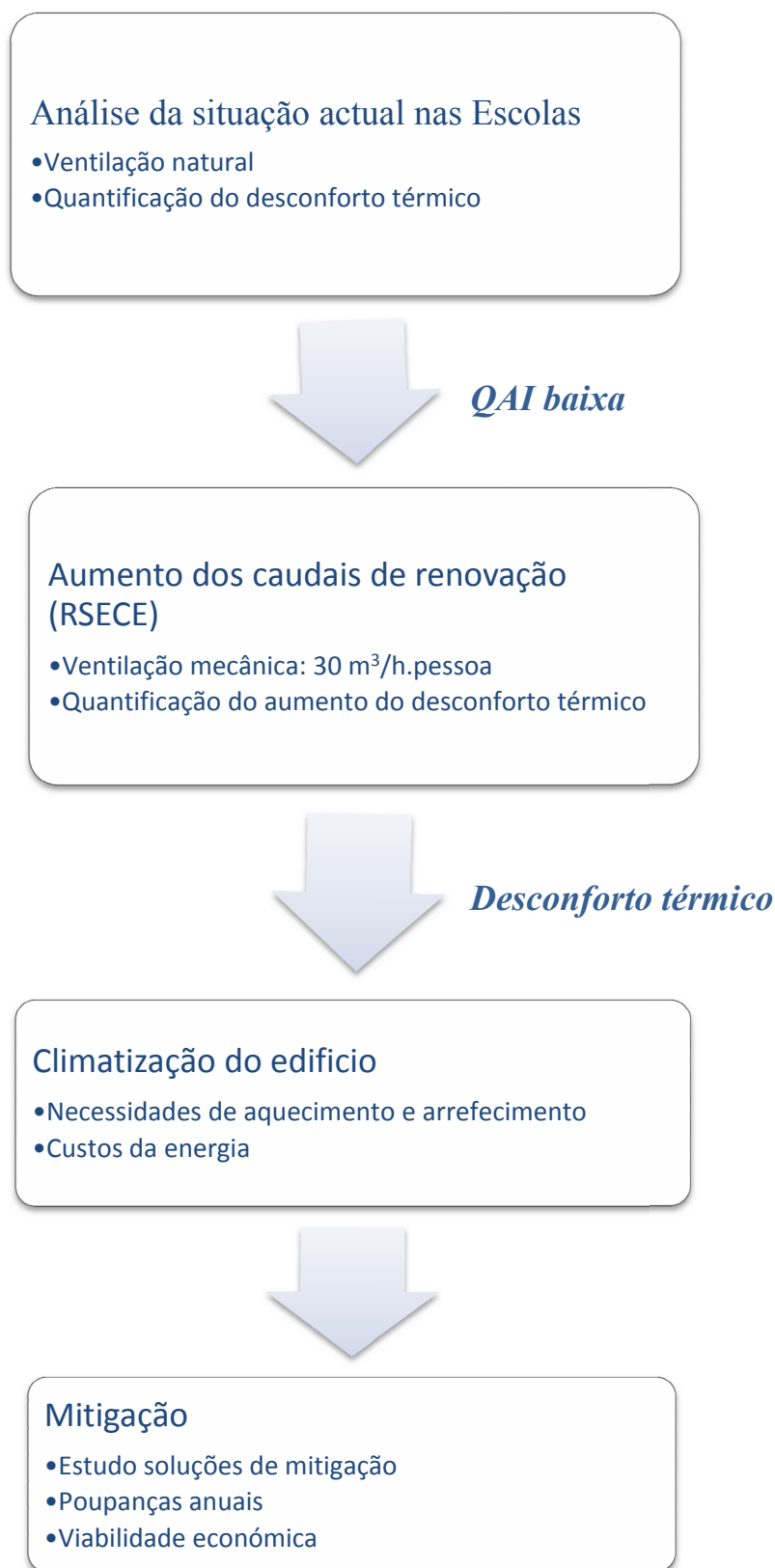


Figura 4 – Representação esquemática da metodologia seguida no trabalho

2. CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo são apresentados os dois casos de estudo analisados no trabalho: uma Escola Primária e um pavilhão de uma Escola Secundária, ambos situados no Porto (41.1N, 8.4W).

Os parâmetros que se pretendem obter são a temperatura de cada zona, para a análise do conforto térmico, quando em regime não climatizado (“free-floating”), e, quando em regime climatizado, as necessidades de aquecimento, arrefecimento e energia consumida pelos ventiladores para a contabilização dos custos com a energia em cada edifício.

Os valores das temperaturas e necessidades são obtidos com o *software* de simulação dinâmica multizona ESP-r (*Environmental Systems Performance, Research version*). No Anexo A é feita uma breve apresentação do programa, nomeadamente do modelo térmico que utiliza. Este tipo de *software* é obrigatório para determinação dos consumos nominais nos grandes edifícios de serviços, ao passo que para pequenos edifícios são possíveis metodologias simplificadas, no entanto neste trabalho será utilizado o ESP-r para ambas as tipologias. Este *software* é tecnicamente validado (norma ASHRAE 140-2004).

2.1. Escola Primária

2.1.1. Apresentação

A Escola seleccionada é um modelo típico do período do Estado Novo: a fachada principal é orientada a sul e as salas só têm janelas nesta orientação, como se verifica na figura 5. Para este trabalho foi modelada **uma parte** da Escola, em ESP-r. Como já referido, a área útil é inferior a 1000 m², pelo que a classificação, para efeitos regulamentares, é de “pequeno edifício de serviços existente”. O período de férias considerado é de 1 de Julho a 31 de Agosto pois, como adiante se referirá, serão utilizados perfis reais de ocupação em detrimento dos apontados pelo RSECE.



Figura 5 – Fotografia da Escola Primária

Áreas

São consideradas quatro salas iguais (duas em cada piso), com uma área de 80 m^2 (8×10) cada, e um “hall” central de entrada com 32 m^2 (4×8), donde resulta uma área útil de 352 m^2 . Em cada sala existem três janelas com 4 m^2 cada a Sul e o pé direito é de 3,7 m. A Escola tem ainda um pequeno armazém a Norte, considerado como área não útil. A representação do edifício em ESP-r encontra-se de seguida:

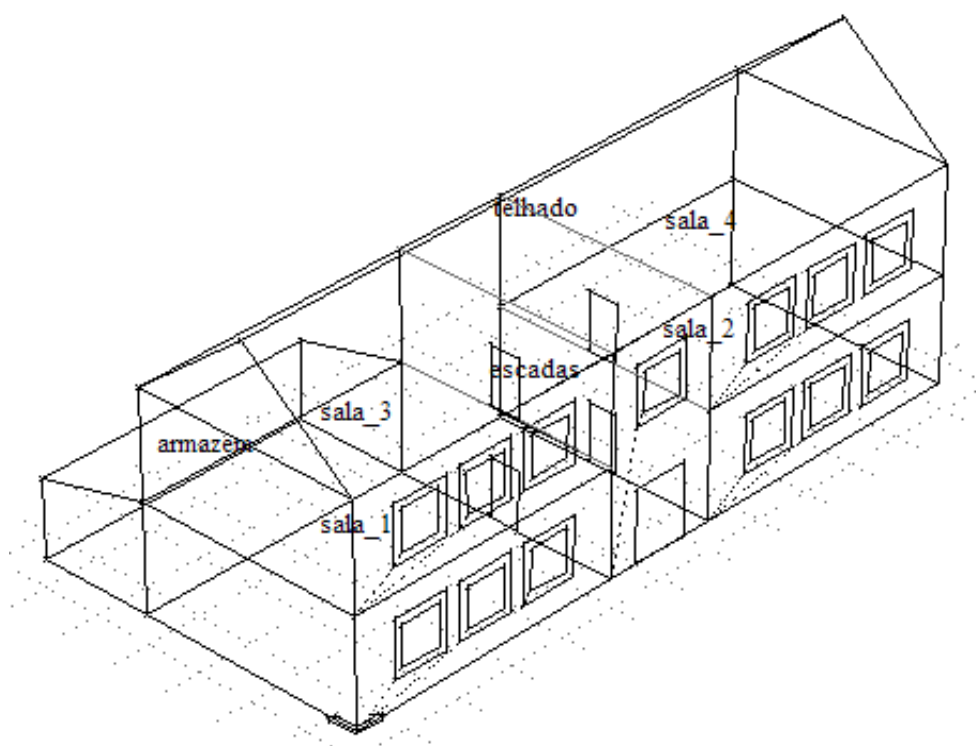


Figura 6 – Geometria da Escola em ESP-r

2.1.2. Caracterização térmica da envolvente

A informação acerca das soluções construtivas adoptadas não pôde ser obtida com detalhe. Desta forma, e pretendendo tipificar o mais possível o edifício em estudo, foram utilizadas soluções construtivas que se entendem como correntes e, tendo em conta a idade da construção, sem isolamento. Os valores característicos foram obtidos da publicação ITE 50, do LNEC (Pina dos Santos, Carlos et al., 2006).

Envolvente opaca

Na tabela seguinte estão definidos os valores dos coeficientes de transmissão térmica (U) para a envolvente opaca. Para a laje da cobertura, devido à variação do valor da resistência superficial com o sentido fluxo do calor, existem três valores possíveis de U . Para a parede interior, a resistência superficial depende do contacto com zona climatizada ou não útil.

Tabela 3 – Coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca

Envolvente	Elementos	e [m]	ρ [kg/m ³]	R [m ² .°C/W]	U [W/m ² .°C]
Parede Exterior	Resistência térmica exterior			0,04	1,0
	Reboco exterior (estruque tradicional)	0,01	1300	0,02	
	Tijolo furado “normal”	0,15	1500	0,39	
	Ar	0,04	1.2	0,11	
	Tijolo furado “normal”	0,11	1500	0,27	
	Reboco interior (estruque tradicional)	0,01	1300	0,02	
	Resistência térmica interior			0,13	
Parede Interior	Resistência “exterior”			0,04 0,13	2,2 1,8
	Reboco “exterior” (estruque tradicional)	0,01	1300	0,02	
	Tijolo furado “normal”	0,15	1500	0,39	
	Reboco “interior” (estruque tradicional)	0,01	1300	0,02	
	Resistência térmica “interior”			0,13	
Laje (chão e tecto)	Resistência térmica “exterior”			0,04 0,10 / 0,17	1,6 1,4 1,3
	Betão isolante “resistente” (ITE 50)	0,24	1200	0,52	
	Resistência térmica “interior”			0,10 / 0,17	

O sótão foi modelado como “espaço francamente ventilado”, com uma taxa de 6RPH e telhado em telha cerâmica ($U = 1,5 \text{ W/m}^2.\text{°C}$)

Envolvente transparente: envidraçados

As janelas são consideradas com caixilharia e quadrículas em madeira, com vidro simples de 4 mm. Como se sabe, os envidraçados tem bastante influência no comportamento térmico dos edifícios, dependendo obviamente da área dos mesmos e também das propriedades ópticas do vidro. Neste trabalho, optou-se pela selecção de um vidro, disponível na biblioteca do ESP-r, com um coeficiente $U = 5,1 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$ (valor igual ao do ITE 50) e com propriedades ópticas benéficas na estação de aquecimento: elevado coeficiente de transmissão, tal como apresentado na figura seguinte:

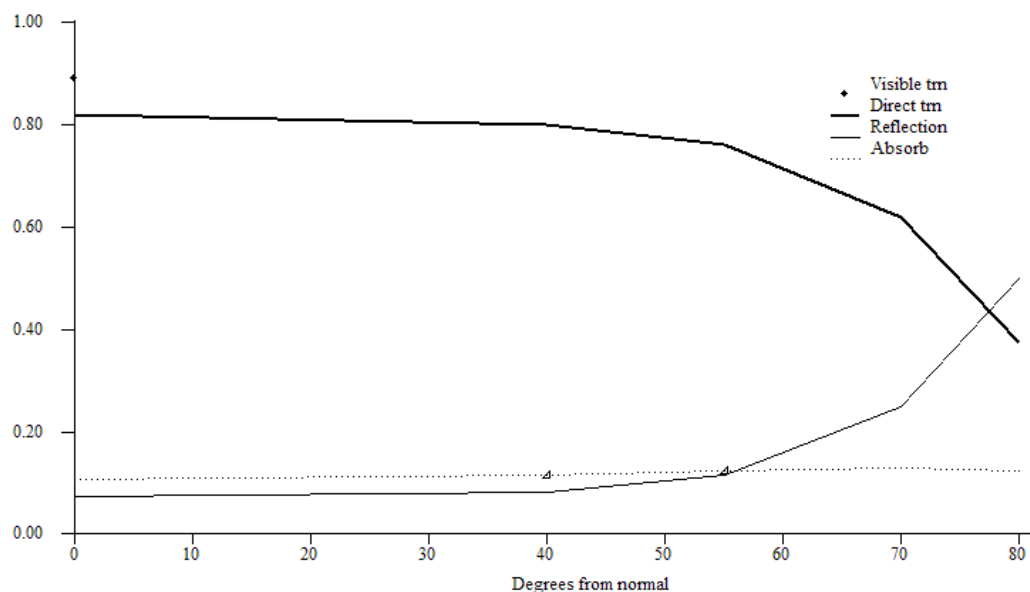


Figura 7 – Propriedades ópticas do envidraçado em função do ângulo de incidência solar

Depois das propriedades ópticas é necessário atender à área de envidraçados a utilizar na simulação, pelo facto de não se poder considerar a área total da janela como inteiramente em vidro (existência de quadrícula de madeira) ou com exposição ideal – existe sombreamento pelo contorno do vão – **apesar de não serem considerados outros tipos de sombreamento**. Uma maneira fácil de quantificar estes dois efeitos é com a utilização dos factores que o RCCTE preconiza para estas situações: F_θ , factor de sombreamento por elementos horizontais; F_f , factor de sombreamento por elementos verticais; F_g , fracção envidraçada. Para o caso em que só existe sombreamento pelo contorno do vão $F_\theta \cdot F_f = 0,9$ e janelas com quadrículas em madeira $F_g = 0,57$. Assim, a área de envidraçados a considerar é: área janela $(4 \text{ m}^2) \times 0,9 \times 0,57 \approx 2 \text{ m}^2$.

2.1.3. Pontes Térmicas

Planas

Não foram consideradas pontes planas, por falta de informação acerca dos talões viga e pilares. Esta simplificação tem pouco impacto pois o coeficiente das paredes exteriores (que não têm isolamento) é bastante similar ao valor comum para este tipo de construção.

Lineares

As pontes térmicas a considerar estão tabeladas no RCCTE e contemplam nove situações (incluindo o contacto de pavimento com o terreno). Quando a realidade não corresponder a nenhuma situação tabelada deve-se utilizar o valor de $0,5 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$ para o coeficiente de transmissão térmica linear – Ψ – o que acontece para as primeiras quatro situações descritas na tabela seguinte, uma vez que o RCCTE não contempla soluções sem isolamento (exceptuando o caso de elementos em contacto com o terreno).

Foram considerados os seguintes tipos de ponte térmica linear:

Tabela 4 – Coeficientes de transmissão e desenvolvimento linear (B) das pontes térmicas consideradas

Ligação:	Ψ [W/m. $^\circ\text{C}$]	B [m]	Isolamento:
Fachada com pavimentos térreos $e_p = 32 \text{ cm}$; $z = < 40 \text{ cm}$	0,50	64	Inexistente
Fachada com pavimentos intermédios $e_p = 24 \text{ cm}$; $e_m = 32 \text{ cm}$	0,50	128	Inexistente
Fachada com cobertura $e_p = 24 \text{ cm}$;	0,50	64	Inexistente
Entre duas paredes verticais $e_m > 22 \text{ cm}$;	0,50	30	Inexistente
Fachada com padieira ou peitoril	0,20	48	Sem contactar com a caixilharia
Elementos em contacto com terreno $0,05 < z < 1,5$	2,5	64	Inexistente

Somando a contribuição das pontes térmicas anteriores ($\sum B.\Psi$) tem-se $313 \text{ W/}^\circ\text{C}$. A contabilização no ESP-r é feita implicitamente. No caso vertente optou-se por reflectir este efeito no valor do coeficiente U das paredes exteriores, que têm uma área (A) de 500 m^2 e valor de $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$, obtendo-se a definição de um U_{eq} (equivalente):

$$A.U_{eq} = A.U + \sum B.\Psi \quad (\text{eq.1})$$

Donde, $U_{eq} = 1,7 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$.

2.1.4. Ganhos Internos

Habitualmente considera-se que os ganhos internos são devidos aos ocupantes, equipamento diverso e iluminação.

A densidade de iluminação é uma grande responsável pelo aumento das necessidades de arrefecimento e diminuição das necessidades de aquecimento (ASHRAE, 2005). Neste mesmo volume surge como valor comum para escritórios na América do Norte $8,6 \text{ W/m}^2$. Neste trabalho, optou-se por um valor ligeiramente mais baixo: $7,5 \text{ W/m}^2$ (Leal, Vítor; 2005) dos quais 67% transferidos por radiação e 33% por convecção (lâmpadas fluorescentes suspensas e não ventiladas, ASHRAE, 2005).

A definição do número de ocupantes e ganhos de equipamentos poderia ser efectuada no âmbito dos perfis que o RSECE impõe para o cálculo do IEE (Índice de Eficiência Energética). No entanto este indicador serve para inferir da qualidade térmica do edifício, e para a etiquetagem energética, o que não consiste na análise principal deste trabalho pelo que, atendendo à especificidade da tipologia (horários e turmas fixas), se consideraram perfis “reais”. Desta forma assume-se que os ganhos de equipamentos são desprezáveis e a ocupação consiste em 25 crianças e 1 professor(a) por sala, das 9 às 12 e das 13 às 17 horas. Para a definição da magnitude dos ganhos por ocupante utilizou-se a tabela seguinte:

Tabela 5 – Taxas de libertação de calor, e respectivas componentes, para diferentes actividades humanas (ASHRAE, 2005)

Degree of Activity		Total Heat, W		Sensible Heat, W	Latent Heat, W	% Sensible Heat that is Radiant ^b	
		Adult Male	Adjusted, M/F ^a			Low <i>V</i>	High <i>V</i>
Seated at theater	Theater, matinee	115	95	65	30		
Seated at theater, night	Theater, night	115	105	70	35	60	27
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115	70	45		
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130	75	55		
Standing, light work; walking	Department store; retail store	160	130	75	55	58	38
Walking, standing	Drug store, bank	160	145	75	70		
Sedentary work	Restaurant ^c	145	160	80	80		
Light bench work	Factory	235	220	80	140		
Moderate dancing	Dance hall	265	250	90	160	49	35
Walking 4.8 km/h; light machine work	Factory	295	295	110	185		
Bowling ^d	Bowling alley	440	425	170	255		
Heavy work	Factory	440	425	170	255	54	19
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470	185	285		
Athletics	Gymnasium	585	525	210	315		

O mais próximo do caso em estudo será “seated, very light work” (3ª linha) a que correspondem 130 W (60% calor sensível e 40% latente, a 24°C) para o caso de homem adulto. Para crianças o valor é 75% daquele, ou seja, 98 W.

A relação calor sensível / latente depende da temperatura ambiente. Na tabela os valores surgem para uma temperatura de 24°C e diz-se ainda que a 27°C há uma quebra de 20% no calor sensível. Considerando isto, e fazendo um extrapolação linear, chega-se a uma percentagem de cerca de 75% de calor sensível a 20°C, que é a temperatura interior de referência na estação de aquecimento. Por sua vez, 60% do calor sensível é transferido por radiação, considerando baixa a velocidade do ar no interior das salas.

Ganhos devidos aos ocupantes: $130 \text{ W} \times 1$ (Professor) + $98 \text{ W} \times 25$ (Crianças) = 2580 W

2.1.5. Condições de fronteira

O ESP-r exige que cada superfície tenha atribuída uma condição de fronteira (J. Hand, 2006). Foram consideradas as seguintes:

- **Elementos em contacto com o exterior:** sujeitos às condições exteriores horárias, segundo os parâmetros do ficheiro climático do ESP-r de 2001 para o Porto (temperaturas, radiação, etc.);
- **Elementos em contacto com o solo:** perfil de temperaturas médias mensais do solo, a uma profundidade de 2 m.

2.1.6. Taxa de renovação horária

O valor da taxa de renovação horária devida à ventilação natural, (em renovações por hora: RPH), é difícil de estimar. Depende fortemente da estanquicidade da caixilharia e da exposição ao vento. No estudo do LQAI em Escolas do Porto, já atrás mencionado, surgem valores em volta das 0,6 RPH, no Inverno, pelo que neste trabalho a taxa nominal média de infiltrações considerada será de 0,6 RPH.

Mais importante que o valor nominal é ter presente que, em regime não condicionado na estação de aquecimento, um maior valor de renovações de ar acarreta um maior desconforto térmico mas, até certo ponto, maior QAI (como prova a verificação com os caudais do RSECE).

Na estação de arrefecimento, em regime de “free-floating”, o valor considerado foi de 2 RPH, assumindo a possibilidade de abertura das janelas por parte dos ocupantes

Em regime condicionado (edifício climatizado), o valor das infiltrações é de menor importância porque durante os períodos de ocupação é imposto desequilíbrio de caudais que anula o seu efeito e as necessidades são pouco dependentes do seu valor fora desses períodos.

2.1.7. Eficiência de ventilação

O regulamento impõe caudais efectivos, pelo que é necessário discutir o valor de eficiência da ventilação a utilizar. Esta depende fortemente do sistema de distribuição de ar, das cargas térmicas a remover, da temperatura de insuflação, etc. O sistema mais comum é o de “mistura”, que garante uma distribuição relativamente uniforme de velocidade do ar, temperatura, humidade e qualidade do ar (ASRHAE, 2005). Um valor típico de eficiência utilizado para este tipo de sistemas, quando o projecto é cuidado, nomeadamente evitando situações de curto-circuito, é de 80%. Será este o valor utilizado como referência neste trabalho, embora se analise mais tarde o efeito de sistemas mais eficientes.

2.1.8. Resultados em “free-floating”

Estes primeiros resultados servem para tentar obter uma imagem da situação actual vivida na Escola, dentro dos limites da modelação realizada, e quantificar depois o aumento do desconforto com o incremento das taxas de ventilação (caudais do RSECE). Para tal analisamos a evolução da temperatura média das quatro salas. É possível fazer a análise com a temperatura média pois as temperaturas nas salas são bastante próximas (desvio máximo de 1,1 °C da média).

O desconforto térmico é analisado pelo Modelo Adaptativo, com 80% de aceitabilidade, tal como está definido na norma ASHRAE 55-2004. Tendo em conta a temperatura média mensal (obtidas para 2001) têm-se as seguintes gamas de temperaturas aceitáveis em cada mês:

Tabela 6 – Temperaturas médias mensais e gamas de temperaturas aceitáveis pelo Modelo Adaptativo

Mês	T_{med} [°C]	T_{min} [°C]	T_{max} [°C]
Janeiro	9,4	17,2	24,1
Fevereiro	10,7	17,4	24,5
Março	11,6	17,7	24,8
Abril	13,2	18,3	25,3
Mai	14,6	18,7	25,7
Junho	17,8	19,8	26,8
Julho	19,0	20,2	27,2
Setembro	18,0	19,8	26,9
Outubro	15,5	19,0	26,0
Novembro	12,2	17,9	25,0
Dezembro	10,3	17,3	24,3

Situação actual

Como atrás referido a taxa a considerar para modelar a situação actualmente vivida nesta tipologia é de 0,6 RPH. No entanto, no mesmo ponto admite-se a possibilidade de utilização de um valor maior para a estação de arrefecimento. O objectivo da utilização deste valor é dar mais consistência ao cálculo da percentagem de desconforto térmico por sensação de calor, uma vez que nessa situação é lícito assumir que os ocupantes abrem as janelas.

As temperaturas são obtidas para o período de ocupação, ou seja, das 9 às 12 e das 13 às 17 horas. De seguida apresentam-se os gráficos com o histograma da temperatura média das quatro salas e a percentagem de tempo de ocupação em desconforto térmico.

No histograma, o rectângulo central representa a zona de temperaturas dentro do conforto térmico. Como se confirma pela tabela anterior, os extremos dependem do mês em questão, daí a gradação da cor, indo de um valor mínimo de 17,2 °C, para Janeiro, até 26,9 °C para Setembro.

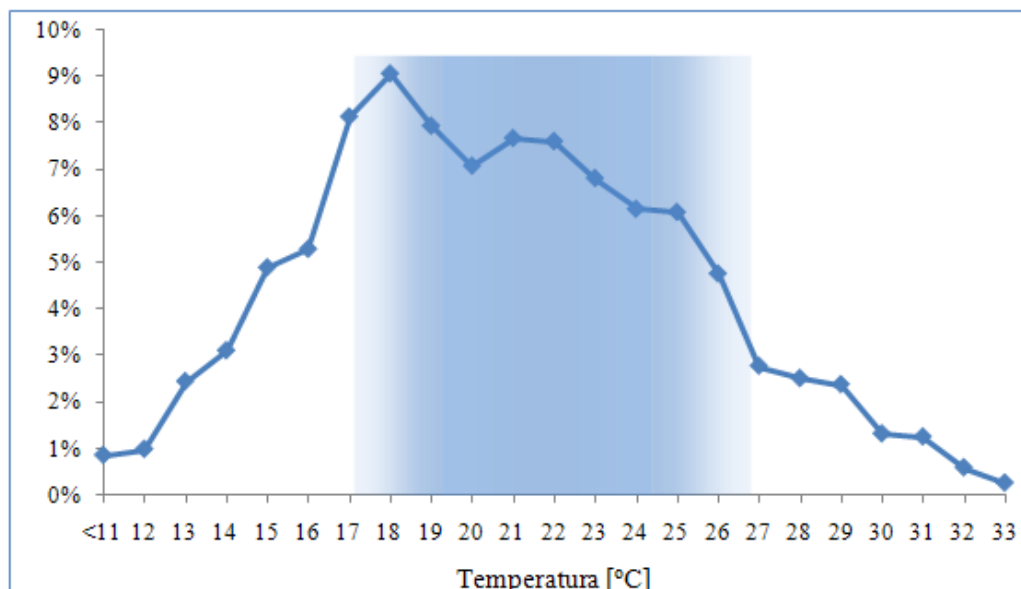


Figura 8 – Histograma da temperatura média das salas na situação actual (0,6 RPH)

As percentagens do tempo em desconforto térmico, ou seja, fora das gamas de temperaturas da tabela anterior, são as seguintes:

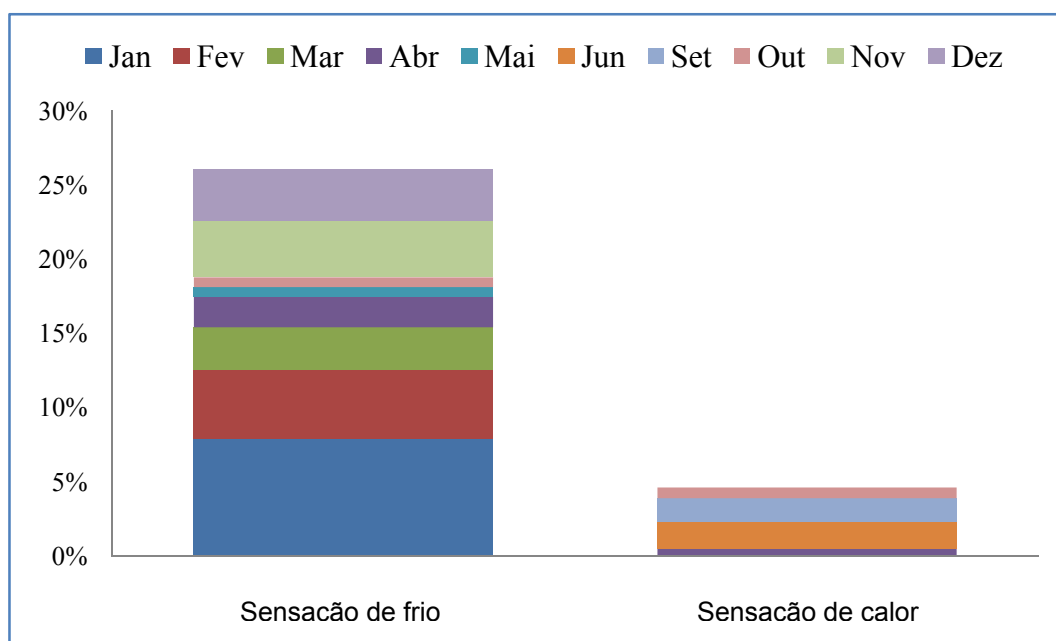


Figura 9 – Percentagem do tempo ocupação com desconforto térmico (contribuições mensais) na situação actual

Aumento da taxa de ventilação - caudais do RSECE

Tem-se agora uma taxa de ventilação superior de forma a cumprir os caudais preconizados pelo RSECE para a manutenção da QAI. Relembrando a ocupação de cada sala (26 pessoas), o caudal mínimo exigido ($30 \text{ m}^3/\text{h.pessoa}$) e a eficiência de ventilação (80%), resulta um caudal total de insuflação de $3900 \text{ m}^3/\text{h}$, ou $975 \text{ m}^3/\text{h}$ para cada sala, que representa 3,3 RPH.

Os resultados são novamente obtidos com base no Modelo Adaptativo, ou seja, tendo em conta as temperaturas mínima e máxima admissíveis que constam da tabela 6. No entanto a utilização desta metodologia não é neste caso tão imediata como anteriormente já que “a abertura de janelas deixou de ser o mecanismo principal de ventilação do espaço”, tal como impõe a norma ASHRAE 55-2004. Contudo a utilização do mesmo método é útil para comparar as situações e a utilização de outro método (por exemplo de Fanger), além de mais complexa, não levaria a resultados capazes de alterar as conclusões (o mais provável seria reforçar a conclusão pela existência de desconforto).

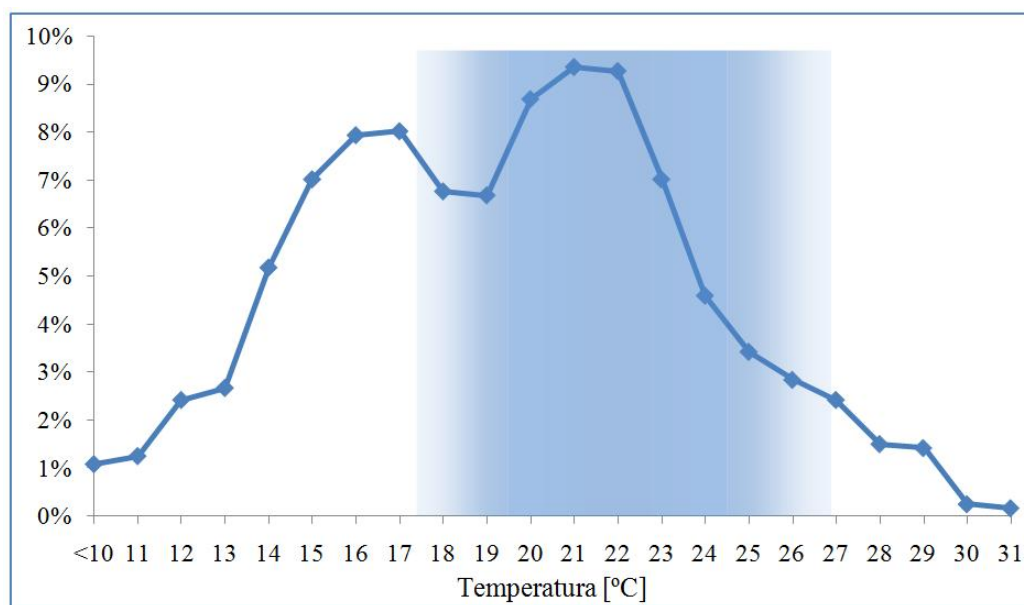


Figura 10 - Histograma da temperatura média das salas

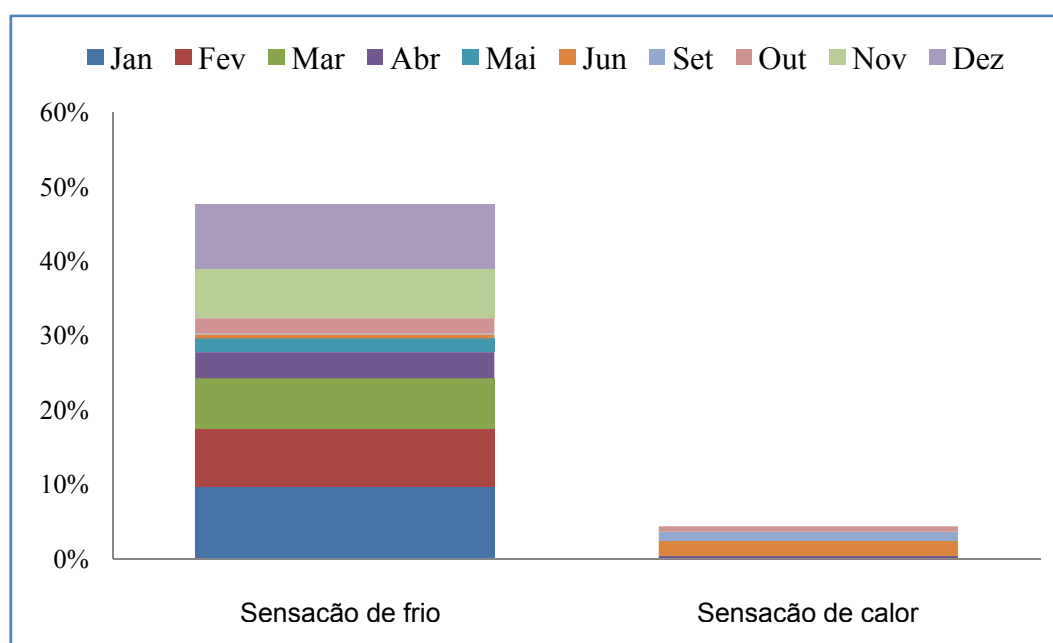


Figura 11 - Percentagem do tempo ocupação em desconforto térmico (contribuições mensais) com os caudais do RSECE

Comparando agora com os resultados obtidos para a situação anterior:

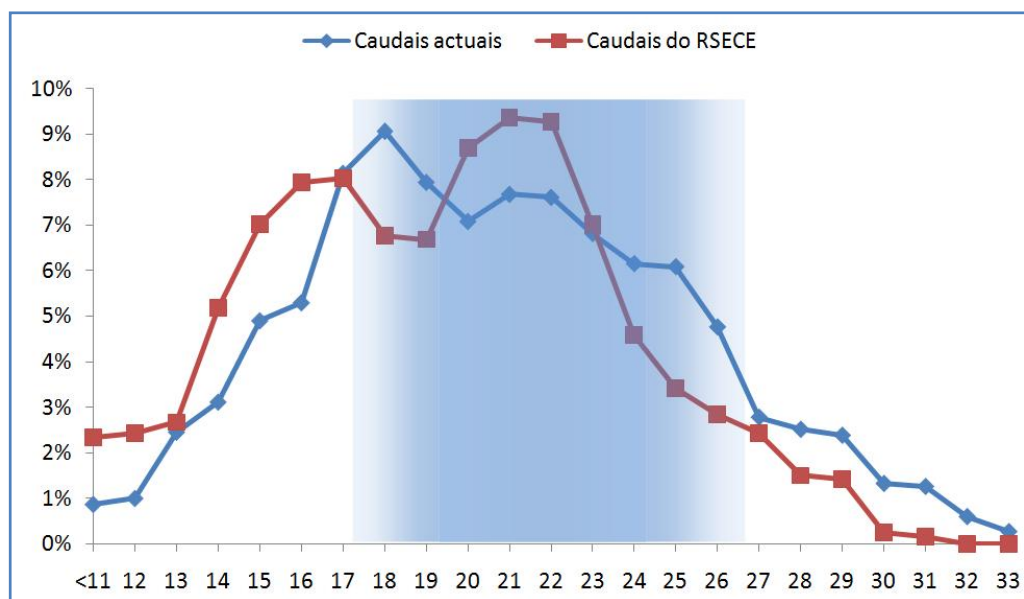


Figura 12 – Comparação dos histogramas de temperatura com as taxas actuais e do RSECE

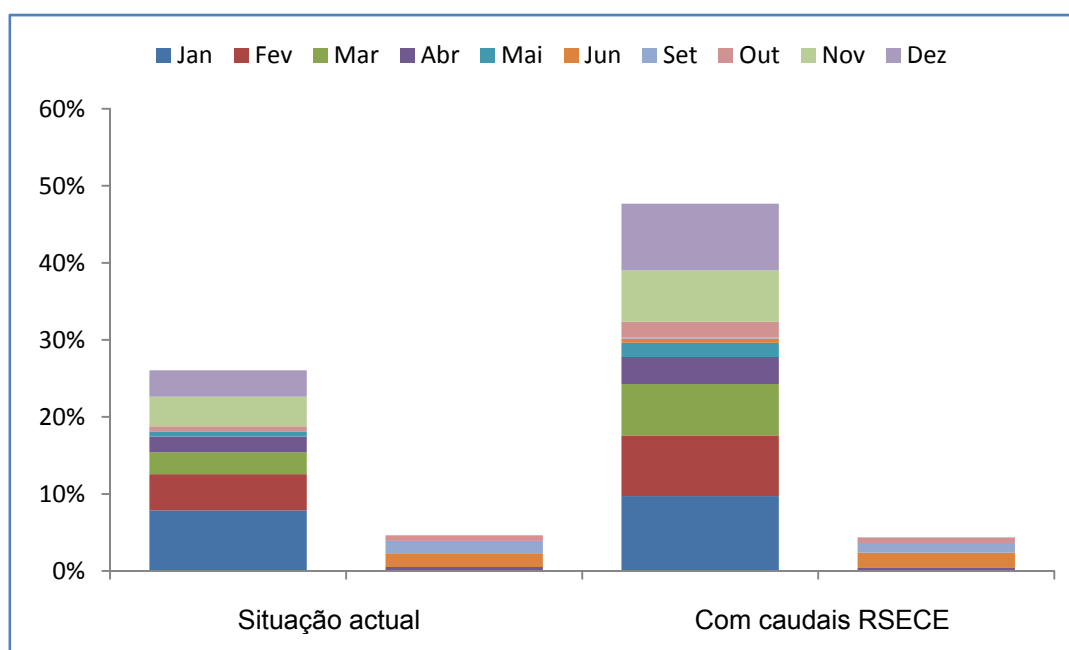


Figura 13 – Comparação da percentagem do tempo de ocupação com desconforto térmico para as situações actual e com caudais do RSECE

Os gráficos anteriores comprovam que a situação actual da Escola, apesar da falta de QAI, é de desconforto térmico (cerca de 30%) e que este aumenta, como seria de esperar, com a utilização de maiores caudais, com uma preponderância clara de desconforto por “frio” (quase 50%). Surge assim como inevitável a utilização de sistemas de climatização que promovam o aquecimento e, eventualmente, o arrefecimento do edifício, de forma a elevar o conforto para níveis aceitáveis.

O desconforto por “calor” (5% do tempo) não é elevado o suficiente para permitir uma opção taxativa por um sistema para arrefecimento. De qualquer forma, os passos seguintes têm em conta a utilização de um sistema para suprir as necessidades de aquecimento e outro para as de arrefecimento.

2.1.9. Resultados com ambiente climatizado

As zonas a climatizar são apenas as salas, que se pretendem agora mantidas entre 20 e 25°C.

Os resultados pretendidos nesta fase são as necessidades de aquecimento e arrefecimento, a energia consumida pelos ventiladores e o custo da energia final para manter estas condições. Os vectores energéticos considerados são o gás natural (aquecimento) e a electricidade (arrefecimento e ventilação), conforme se comprovará aquando da selecção dos sistemas primários. É também contabilizado o gasto mensal em energia primária. Os factores de conversão são 0,29 e 0,086 kgep/kWh, respectivamente, para a electricidade e o gás natural.

Sistemas de climatização: Para suprir as necessidades de aquecimento considerou-se uma caldeira a gás natural com eficiência de 87%. Para as de arrefecimento um chiller com um COP de 3. Ambos os valores são dados como referência no RSECE.

Leis de controlo: foi seleccionado o comando “Basic Control” do ESP-r. Este é um controlo ideal que injecta ou extrai do espaço energia suficiente para manter a temperatura entre os valores definidos (“set points”). Considerando que o sistema está ligado das 9 às 17 horas, consegue-se que em mais de 90% do tempo de ocupação a temperatura esteja compreendida entre os 20 e os 25°C.

Consultando os tarifários da EDP e da Portgás, obtêm-se os seguintes custos da energia:

- Gás Natural: 0,058 € / kWh;
- Electricidade: 0,114 € / kWh.

2.1.9.1. Situação actual: 0,6 RPH

São apresentados de seguida os resultados que se obteriam em caso de climatização da Escola na situação actual, ou seja, apenas com um caudal de infiltrações de 0,6 RPH, sem caudal insuflado:

Tabela 7 – Necessidades e custo energia para a situação actual

Nec. Aquecimento [kWh/m ² .ano]	Nec. Arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Custo Energia [€]
11,1	3,8	312

2.1.9.2. Caudais do RSECE

Face ao caso anterior, há a acrescentar a insuflação de ar exterior, que impõe custos com a energia dos ventiladores e com o aquecimento/arrefecimento desse mesmo ar. Os resultados obtidos são a referência para esta tipologia.

Potência dos ventiladores: a potência dos ventiladores é um factor importante no consumo energético de qualquer edifício. Depende do caudal a insuflar, das perdas de carga do circuito e da eficiência do ventilador. Apesar disso, para simplificar e sistematizar a análise, optou-se pela utilização do conceito de SFP (“Specific Fan Power”). Como referência para esta situação utilizou-se um valor de $0,5 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Este valor tem em conta a utilização de um ou mais ventiladores mas apenas para insuflação, saindo o ar pelas frinchas ou outras aberturas.

Para um caudal de $3900 \text{ m}^3/\text{h}$ resulta uma potência de $1,95 \text{ kW}$.

Tabela 8 – Matriz energética para a situação de referência

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	2732	0	3140	0	314	270	0	91	361
Fev	1699	0	1953	0	273	168	0	79	247
Mar	1196	0	1375	0	300	118	0	87	205
Abr	628	26	722	9	287	62	3	83	148
Mai	233	0	268	0	314	23	0	91	114
Jun	13	325	15	108	287	1	31	83	116
Set	2	262	2	87	273	0	25	79	105
Out	182	93	209	31	314	18	9	91	118
Nov	1365	0	1569	0	300	135	0	87	222
Dez	2105	0	2420	0	287	208	0	83	291
Total	10154	706	11672	235	2948	1004	68	855	1927

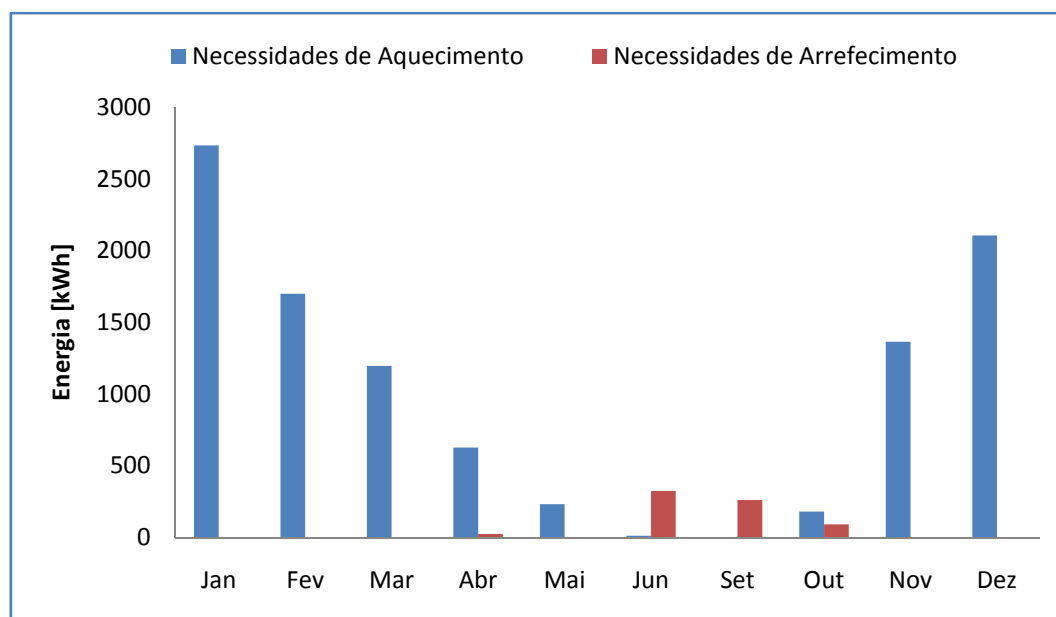


Figura 14 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento

Ou, dividindo pela área:

Tabela 9 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para situação de referência

Nec. Aquecimento [kWh/m ² .ano]	Nec. Arrefecimento [kWh/m ² .ano]
28,8	2,0

Considerando os preços da energia atrás referidos, os custos vêm:

Tabela 10 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
677	27	337	1041

Comparando a situação actual com a dos caudais regulamentares, (tabelas 7 e 9), verifica-se que as necessidades de arrefecimento descem mas as necessidades de aquecimento são bastante superiores. Apesar de as infiltrações poderem ser ligeiramente maiores na realidade, pode-se concluir que mais de metade das necessidades de aquecimento devem-se à elevação (até 20°C) da temperatura do ar exterior que é insuflado nas salas. Este ponto indica que as medidas de mitigação dirigidas à diminuição das necessidades de aquecimento do ar, como a recuperação de calor e a diminuição do caudal insuflado (aumentando a eficiência da ventilação) apresentam, *a priori*, maior potencial.

Os resultados anteriores apontam claramente as necessidades de aquecimento como predominantes, sendo que as de arrefecimento correspondem apenas a 7% destas.

Surge ainda brutal o aumento dos custos com a climatização do edifício, face aos previstos com a situação actual, de 312 para 1041 €, ou seja, um aumento de 230%.

Como referido aquando da definição das propriedades ópticas dos envidraçados, não se considera qualquer tipo de sombreamento (exterior ou interior). De qualquer forma, importa referir que as necessidades de arrefecimento poderiam ser reduzidas cerca de 10% com a utilização de uma solução para os envidraçados que traduzisse uma maior sombreamento, como representado na figura seguinte:

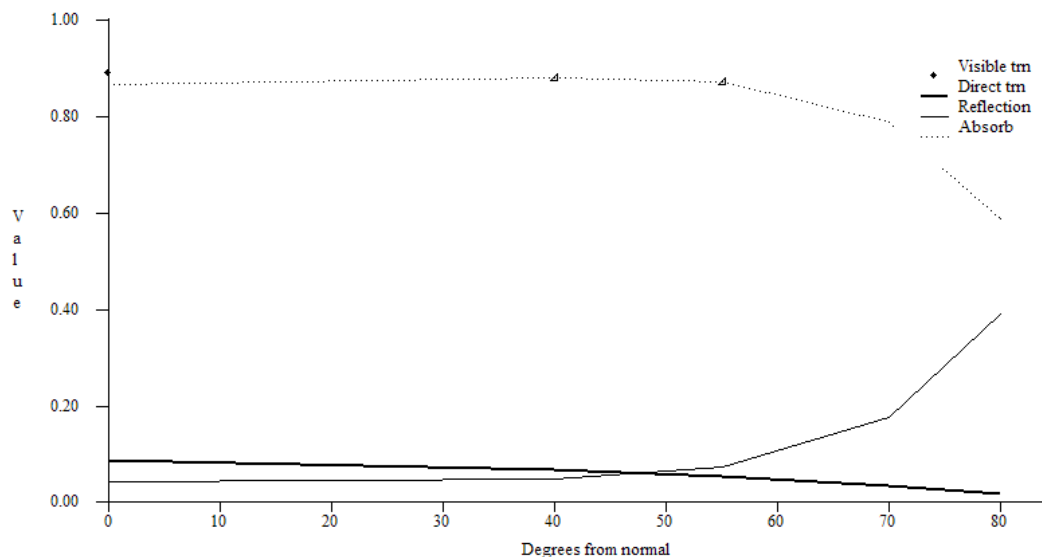


Figura 15 – Propriedades ópticas de uma hipotética solução para os envidraçados

2.1.10. Mitigação

Partindo dos resultados anteriores para a situação de referência, serão de seguida estudadas algumas soluções possíveis de mitigação dos consumos. Tal como referido nos Objectivos foram consideradas soluções típicas de optimização, a saber:

- Melhoria da envolvente;
- Sistemas de maior eficiência:
 - Ventiladores com SFP de $0,2 \text{ W/m}^3 \cdot \text{h}$;
 - Sistemas de distribuição de ar com 100% de eficiência de ventilação;
 - Caldeira de condensação, com rendimento de 105%;
 - Bomba de calor, com COP=4;
- Recuperação de calor.

a) Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,7 RPH

Mantêm-se a mesma formulação em ESP-r da situação de referência, mas considerando a existência de recuperação de calor com 80% de eficiência e uma maior potência dos ventiladores, para compensar a perda de carga introduzida pelo permutador e pela necessidade de um segundo ventilador para o caudal de extracção:

Potência dos ventiladores: neste caso são necessários dois ventiladores porque para existir recuperação os caudais devem ser cruzados num permutador adicional, pelo que se considera um SFP igual ao dobro do utilizado na situação de referência, ou seja, de $1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, de que resulta uma potência de 3,9 kW.

A existência de recuperação implica também a utilização de caudais de insuflação e extracção equilibrados, o que propicia a existência de infiltrações. Uma forma prática de determinar a sua magnitude é com o método do RCCTE. Para tal é necessário conhecer a classe de exposição do edifício. Esta depende da zona urbana, e por vezes territorial, em que este se insere e da altura acima do solo. Neste caso foi considerada uma classe de exposição 2, numa escala de 1 a 4, por ordem crescente de severidade de exposição ao vento. Assim, para edifícios com ventilação mecânica equilibrada, a taxa de infiltrações a considerar é de 0,7 RPH.

A recuperação de calor é feita apenas para as necessidades de aquecimento, só fazendo sentido a existência de recuperação nos meses em que estas sejam suficientemente elevadas para compensar o aumento de custos de energia com ventilação (aumento da potência). Fora desses meses os resultados são iguais aos obtidos para a situação de referência (incluindo a energia gasta com o ventilador).

O gráfico seguinte compara os custos com energia para as situações de existência ou não de recuperação de calor:

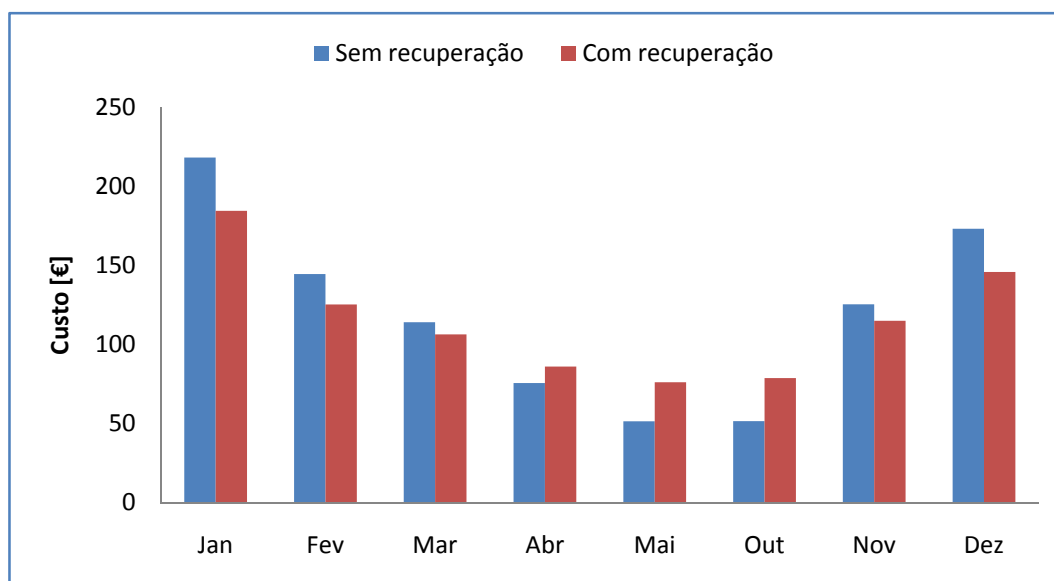


Figura 16 - Comparação de custos de energia final em cada mês, nas situações de existência ou não de recuperação de calor

A conclusão que se pode retirar do gráfico está em linha com o que foi atrás referido, pelo que se considera a existência de recuperação nos meses de Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março. Os resultados são os da tabela seguinte:

Tabela 11 – Matriz energética para situação de recuperação calor com 0,7 RPH de infiltrações

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec.	Arref.	Aquec.	Arref.	Ventilador	Aquec.	Arref.	Vent.	
Jan	1690	0	1943	0	628	167	0	182	349
Fev	943	0	1084	0	546	93	0	158	252
Mar	566	0	651	0	601	56	0	174	230
Abr	<i>Valores iguais aos da tabela 8: situação de referência</i>								
Mai									
Jun									
Set									
Out									
Nov	694	0	798	0	601	69	0	174	243
Dez	1203	0	1383	0	573	119	0	166	285
Total	5818	706	6687	235	4423	575	68	1283	1926

Tabela 12 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
388	27	506	920

A diminuição dos custos é de 121 €/ano (12%). A diminuição das necessidades de aquecimento seria superior se não existissem infiltrações (caudal adicional de ar exterior a ser aquecido), pelo que de seguida se analisará a redução das taxas de infiltrações, considerando uma envolvente de elevada estanquicidade.

b) Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,1 RPH

A questão das infiltrações é um ponto sensível quando se pretende fazer recuperação de calor. A redução da sua magnitude é sempre benéfica para as necessidades de aquecimento, tornando-se ainda mais importante quando se pretende recuperação de calor já que não se pode utilizar o mecanismo de desequilíbrio de caudais para as minimizar. O estudo seguinte considera uma taxa de infiltrações bastante reduzida, que só se consegue à custa de uma envolvente de elevada qualidade, muito estanque, talvez até pouco realista no âmbito da tipologia aqui analisada. No entanto o objectivo é aferir o limite da poupança conseguida com este tipo de solução.

Aparte a menor taxa de infiltração, todos os outros parâmetros se mantêm do caso anterior.

Tabela 13 – Matriz energética para situação de recuperação calor com 0,1 RPH de infiltrações

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Ventilador	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	1387	0	1594	0	628	137	0	182	319
Fev	730	0	839	0	546	72	0	158	231
Mar	396	0	455	0	601	39	0	174	213
Abr	<i>Valores iguais aos da tabela 8: situação de referência</i>								
Mai									
Jun									
Set									
Out									
Nov	516	0	593	0	601	51	0	174	225
Dez	958	0	1101	0	573	95	0	166	261
Total	5045	706	5799	235	4423	499	68	1283	1850

Tabela 14 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
336	27	506	869

c) Melhoria de envolvente

A melhoria da envolvente traduz-se numa utilização de soluções construtivas de maior qualidade, que permitam alcançar menores valores de coeficiente de transmissão e a redução da severidade das situações de ponte térmica.

Considerou-se para tal a existência de isolamento pelo exterior de forma a obter um coeficiente de transmissão de $0,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para as paredes exteriores e para a cobertura e os seguintes valores para os coeficientes de perdas lineares nas pontes térmicas:

Tabela 15 - Coeficientes de transmissão das pontes térmicas com isolamento melhorado

Ligação:	Ψ [W/m. $^\circ\text{C}$]	B [m]	Isolamento:
Fachada com pavimentos térreos $d > 60 \text{ cm}$; $z < 40 \text{ cm}$	0,15	64	Exterior
Fachada com pavimentos intermédios $15 \text{ cm} < e_m < 32 \text{ cm}$	0,10	64	Exterior
Fachada com cobertura $e_p = 24 \text{ cm}$;	0,50	64	Contínuo Exterior
Entre duas paredes verticais $e_m > 22 \text{ cm}$;	0,15	30	Exterior
Fachada com padieira ou peitoril	0	48	Exterior em contacto com caixilharia
Elementos em contacto com terreno $0,05 < z < 1,5$	1,8	64	Perimetral

Utilizando a equação 1 e procedendo como aí obtêm-se, para as paredes exteriores, um $U_{equi} = 0,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

A par com a melhoria da envolvente opaca também se considerou uma solução para a envolvente transparente com um menor coeficiente de transmissão térmica, escolhendo-se para tal uma solução com vidro duplo, baixando assim o valor de U de 5,1 para $3,2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, valor apontado pelo ITE 50 para este tipo de solução. No entanto, comparando as propriedades ópticas do vidro simples anteriormente utilizado e este vidro duplo (figuras 7 e 17), verifica-se que a utilização deste tem como consequência também a diminuição da radiação transmitida pelo que o impacto no valor das necessidades de aquecimento é bastante reduzido o que, tendo em conta os envidraçados exclusivamente a Sul, é compreensível. Este facto contribui ainda para atenuar o aumento das necessidades de arrefecimento provocado pela redução da condução pela envolvente.

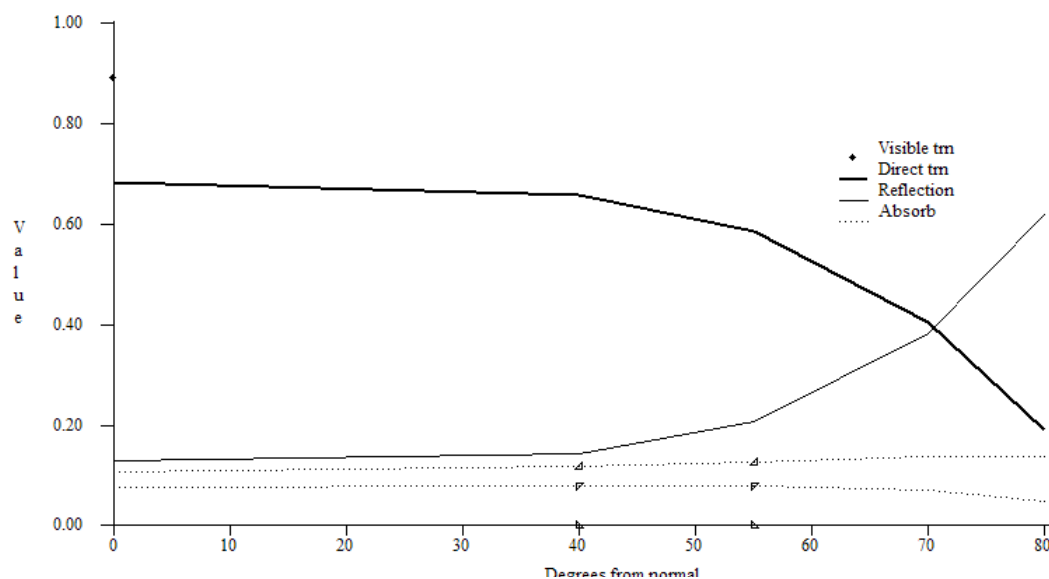


Figura 17 – Propriedades ópticas do novo envidraçado (vidro duplo) em função do ângulo de incidência solar

A tabela seguinte mostra a diminuição do coeficiente de transmissão para a solução melhorada:

Tabela 16 – Comparação do coeficiente de transmissão da envolvente opaca e transparente antes e depois da consideração de melhoria de envolvente

	Área [m ²]	Solução anterior [W/m ² .°C]	Solução melhorada [W/m ² .°C]
Parede Exterior ³	500	1,7	0,9
Envidraçados	48	5,1	3,1
Laje da cobertura	352	1,5	0,6

Com os valores anteriores obtém-se um U ponderado de $1,8 \text{ W/m}^2.\text{°C}$ para as soluções anteriores (sem isolamento) e de $0,9 \text{ W/m}^2.\text{°C}$ para as soluções melhoradas (com isolamento), o que significa que a melhoria da envolvente se traduziu numa diminuição de 50% no coeficiente de transmissão.

³ O valor apresentado traduz também a contribuição das pontes térmicas.

Tabela 17 – Matriz energética para a situação de envolvente melhorada

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	2165	0	2489	0	314	214	0	91	305
Fev	1317	0	1514	0	273	130	0	79	209
Mar	884	0	1016	0	300	87	0	87	174
Abr	471	25	541	8	287	47	2	83	132
Mai	144	1	166	0	314	14	0	91	105
Jun	6	303	7	101	287	1	29	83	113
Set	0	279	0	93	273	0	27	79	106
Out	83	117	95	39	314	8	11	91	111
Nov	997	0	1146	0	300	99	0	87	186
Dez	1683	0	1934	0	287	166	0	83	249
Total	7750	725	8908	242	2948	766	70	855	1691

Tabela 18 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
517	28	337	881

d) Aumento da eficiência de ventilação

O aumento da eficiência de ventilação permite reduzir o caudal insuflado, o que implica redução das necessidades de aquecimento e da energia para os ventiladores. Considerando uma eficiência de 100% (ideal) o caudal necessário desce de 3900 para 3120 m³/h.

Potência dos ventiladores: tendo em conta o caudal e o SFP a potência é de 1,56 kW.

Tabela 19 - Matriz energética para 100% de eficiência de ventilação

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	2366	0	2720	0	251	234	0	73	307
Fev	1429	0	1643	0	218	141	0	63	205
Mar	961	0	1105	0	240	95	0	70	165
Abr	501	31	576	10	229	50	3	67	119
Mai	157	1	180	0	251	16	0	73	88
Jun	6	342	7	114	229	1	33	67	100
Set	0	318	0	106	218	0	31	63	94
Out	125	100	144	33	251	12	10	73	95
Nov	1125	0	1293	0	240	111	0	70	181
Dez	1792	0	2060	0	229	177	0	67	244
Total	8462	792	9726	264	2359	836	77	684	1597

Tabela 20 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
564	30	270	864

e) Aumento da eficiência dos ventiladores (redução do SFP)

Designar esta medida apenas como aumento de eficiência dos ventiladores é algo redutor pois na realidade o que se pretende é baixar a energia gasta por estes para a qual contribuem vários factores do sistema de distribuição de ar nomeadamente a eficiência do ventilador em si (na transmissão da energia ao ar), do sistema de transmissão motor/ventilador, a magnitude das perdas de carga nas condutas, etc.

Na situação de referência o valor de SFP foi de 0,5 W/(m³/h), valor passível de ser melhorado, actuando nos factores atrás referidos. Como valor para soluções de elevada eficiência considerou-se 0,2 W/(m³/h), de que resulta uma potência de 780 W (recorde-se o caudal a insuflar: 3900 m³/h). A diminuição desta potência tem, obviamente, apenas implicação na energia necessária para os ventiladores. A energia requerida por estes desce de 2948 para 1179 kWh e, consequentemente, os custos para 839 €.

f) Utilização de sistemas de maior eficiência para as necessidades de aquecimento

- **Caldeira de condensação com rendimento de 105% (base PCI⁴):** tem a vantagem de ser uma solução menos onerosa que a bomba de calor e continuar a utilizar o mesmo vector energético (gás natural), mas agora de forma mais eficiente, se se comparar com o rendimento de 87% da caldeira da situação de referência. Com um rendimento de 105%, este sistema permite diminuir as necessidades de energia final e assim os custos em 116 €, para 925 € (por ano);
- **Bomba de calor: COP = 4:** o maior investimento inicial é compensado pelo enorme salto na eficiência, mesmo considerando a utilização de um vector energético mais oneroso. As poupanças cifram-se em 387 €.

⁴ Poder Calorífico Inferior

g) Melhoria integrada

Por último analisa-se uma situação com a junção das medidas anteriores. Tem o interesse de ver qual o custo mínimo (com estas medidas) da climatização do edifício e de ajudar a analisar a influência de cada medida em conjunto, de potenciais sinergias ou por outro lado identificar medidas que fazem menos sentido juntas. As medidas a considerar são:

- Recuperação com infiltrações de 0,1 RPH;
- Melhoria da envolvente;
- Eficiência de ventilação de 100%;
- Redução de SFP, “Specific Fan Power” ($SPF^5 = 2 \times 0,2$ ou $0,2 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$);
- Bomba de calor.

Tabela 21 – Matriz para a situação de melhoria integrada

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	524	0	131	0	201	38	0	58	96
Fev	182	0	46	0	175	13	0	51	64
Mar	33	0	8	0	193	2	0	56	58
Abr	35	34	9	11	93	3	3	27	33
Mai	0	2	0	1	101	0	0	29	30
Jun	0	351	0	117	93	0	34	27	61
Set	0	363	0	121	88	0	35	26	61
Out	0	146	0	49	101	0	14	29	44
Nov	80	0	20	0	193	6	0	56	62
Dez	365	0	91	0	184	26	0	53	80
Total	1219	896	305	299	1421	88	87	412	587

Tabela 22 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
35	34	162	231

A redução de custos nesta situação é enorme (78%), ou seja, menos de um quarto da situação de referência. No entanto este resultado é obtido à custa da utilização de uma bateria de medidas com um custo total que, *a priori*, não deve ter viabilidade económica. Existem ainda medidas que perdem influência, nomeadamente a melhoria da envolvente, a eficiência da ventilação e acima de tudo a bomba de calor. Por outro lado, a existência de ventiladores com reduzido SFP é especialmente útil conjugada com a recuperação de calor.

⁵ Conforme exista ou não recuperação de calor (o valor duplica com a existência de recuperação).

2.1.11. Resultados com ambiente climatizado para perfis do RSECE

Antes de se apresentar uma tabela com o resumo dos dados obtidos nas várias simulações é útil fazer uma última simulação mas agora utilizando os perfis de ocupação e equipamentos definidos no RSECE. O cálculo do IEE, que é a base da etiquetagem energética, é feito utilizando estes perfis. Estes resultados permitem ainda uma comparação com os obtidos na situação de referência, com perfis “reais”, e ainda fazer uma ponte para os resultados da próxima tipologia estudada, em que a situação de referência será definida em termos destes perfis nominais.

As densidades propostas no regulamento são:

- Ocupação: 10 m²/pessoa;
- Equipamento: 5 W/m²;

Os valores da iluminação são os da situação de referência (7,5 W/m²), uma vez que o RSECE não estipula um valor padronizado. Também as componentes sensível, latente, radiativa e convectiva dos ganhos devidos aos ocupantes se mantêm da situação anterior e a taxa a considerar é de 130W. No caso do equipamento, na ausência de melhor informação, utiliza-se uma repartição equitativa entre as partes convectiva e radiativa dos ganhos.

Os valores anteriores de densidade devem, para cada hora, ser multiplicados pela percentagem correspondente no respectivo perfil. Os perfis de ocupação, equipamento e iluminação são apresentados no Anexo B.

Leis de controlo: o tempo de ocupação passa das anteriores sete horas diárias para doze. Assim o sistema de climatização estará ligado das 8 às 20 horas, coincidindo com o período de ocupação.

Potência dos ventiladores: A densidade de ocupantes definida no RSECE é menor do que a “real” pelo que, mantendo o valor do caudal por pessoa e a eficiência de ventilação, o novo caudal a insuflar cai para 1320 m³/h. Este caudal é definido para 100% de ocupação, apesar de nem sempre este valor se verificar (ver perfil de ocupação Anexo B). Com esta opção garante-se uma maior QAI.

Com o mesmo SFP de 0,5 W/(m³.h) obtém-se uma potência de 0,66 kW.

Existe ainda uma outra alteração a considerar: os períodos de férias são agora de 20 de Dezembro até 1 de Janeiro e de 1 de Agosto até 14 de Setembro, por contraponto ao período de 1 de Julho a 31 de Agosto considerado na situação de referência.

De resto, todas as outras considerações se mantêm válidas neste caso.

Tabela 23 – Matriz para a situação de simulação com perfis do RSECE

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	2278	0	2618	0	174	225	0	51	276
Fev	1289	0	1482	0	158	127	0	46	173
Mar	803	0	923	0	174	79	0	51	130
Abr	427	37	491	12	166	42	4	48	94
Mai	117	1	134	0	182	12	0	53	64
Jun	1	380	1	127	166	0	37	48	85
Jul	0	352	0	117	174	0	34	51	85
Set	0	25	0	8	158	0	2	46	48
Out	95	105	109	35	182	9	10	53	72
Nov	1001	0	1151	0	174	99	0	51	149
Dez	1067	0	1226	0	111	105	0	32	138
Total	7078	900	8136	300	1822	700	87	528	1315

Tabela 24 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
472	34	208	714

Comparando com a situação de referência, as necessidades de aquecimento caem 30%, as de arrefecimento sobem cerca de 200 kWh e a energia gasta com os ventiladores cai mais de 40% pois, apesar do aumento de sete para doze horas de funcionamento diário, o caudal a insuflar é cerca de 1/3, assim como a potência.

2.1.12. Resumo dos resultados e classificação energética

A tabela seguinte mostra um resumo dos resultados – necessidades de aquecimento e arrefecimento e energia dispendida com os ventiladores.

O cálculo do IEE para a classificação energética é feito utilizando os perfis nominais do RSECE apesar de até aqui se terem utilizado perfis “reais”. Este indicador constitui uma ferramenta de comparação da qualidade térmica e eficiência energética dos edifícios e, no contexto deste trabalho, também de comparação entre as várias soluções de mitigação propostas, a par com o valor das poupanças e a análise económica.

O método de cálculo do IEE é descrito no RSECE é apresentado no Anexo C.

Tabela 25 – Resumo dos dados obtidos nas simulações anteriores e classificação energética

	Necessidades Aquecimento [kWh/ano]	Necessidades Arrefecimento [kWh/ano]	Energia Ventilador [kWh]	Custos da Energia [€/ano]	Poupança [€/ano]	IEE	Classe
Situação Referência	10154	706	2948	1041	-	11,0	B
Caldeira de condensação	Situação Referência	Situação Referência	Situação Referência	925	116	10,7	
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,7 RPH	5818	Situação Referência	4423	920	121	11,1	
Melhoria Envolvente	7750	725	Situação Referência	881	160	10,6	
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,1 RPH	5045	Situação Referência	4423	869	172	11,0	
Eficiência Ventilação 100%	8462	792	2359	864	177	10,4	
Maior eficiência Ventiladores	Situação Referência	Situação Referência	1179	839	202	10,1	A
Perfis do RSECE	7078	900	1822	714	327	9,8	
Bomba de calor	Situação Referência	Situação Referência	Situação Referência	654	387	10,5	
Melhoria Integrada	1219	896	1421	231	810	8,8	A

A reter, o facto de a recuperação de calor com 0,7 RPH de infiltrações conduzir a um IEE ligeiramente maior do que a situação de referência, apesar da redução de custos, o que evidencia outra questão: o valor das poupanças não tem uma correlação forte, ou pelo menos linear com o valor do IEE. Reparando na tabela anterior, em que as medidas estão ordenadas por ordem crescente de poupança, comprova-se esta afirmação, uma vez que o valor no IEE não apresenta a mesma ordenação. Isto reflecte o facto de o cálculo do IEE “penalizar” a utilização do vector energético electricidade, por comparação ao gás natural, algo que os preços não penalizam tão severamente.

De seguida repete-se a tabela anterior mas apenas com os aumentos ou reduções das necessidades de aquecimento, arrefecimento, energia de ventilador e poupanças em percentagem do valor correspondente para a situação de referência.

Tabela 26 – Variações das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, energia do ventilador e dos custos da energia

	Necessidades Aquecimento [%]	Necessidades Arrefecimento [%]	Energia Ventilador [%]	Diferença Custos [%]
Caldeira de Condensação	-	-	-	-11
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,7 RPH	-43	-	+50	-12
Melhoria envolvente	-24	+3	-	-15
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,1 RPH	-50	-	+50	-17
Eficiência ventilação 100%	-17	+12	-20	-17
Maior eficiência ventiladores	-	-	-60	-19
Perfis do RSECE	-30	+27	-38	-31
Bomba de Calor	-	-	-	-37
Melhoria Integrada	-88	+27	-52	-78

2.1.13. Análise económica simplista das medidas anteriores

Este é um passo fundamental em qualquer análise do tipo da que se desenvolve neste trabalho. Mais importante que apresentar as poupanças anuais com cada medida é necessário apontar um período máximo de retorno económico do investimento inicial.

Esta análise necessita sempre de bastante informação, muita da qual não pôde ser obtida no âmbito deste trabalho pelo que não se poderá ir tão longe quanto o desejável e os valores avançados serão sempre aproximações mais ou menos grosseiras. De qualquer forma é mais uma informação disponível e, a par com as poupanças anuais e o IEE, mais uma ferramenta de hierarquização das medidas de mitigação.

A metodologia seguida está em linha com a proposta no RSECE para aferir da viabilidade económica de uma determinada medida: é calculado um parâmetro, o “período de retorno simples”, que mais não é que o custo adicional com a(s) medida(s) de mitigação a dividir pela poupança anual. Não são contabilizados encargos financeiros ou inflação e assume-se que não haverá necessidade de manutenções extras, para simplificar a análise.

Obviamente, a definição de um “período de retorno” ou “pay-back” máximo admissível para uma determinada medida está intimamente ligado ao tempo de vida médio do equipamento ou alteração efectuada, pelo que é difícil definir um valor fixo. De qualquer forma, para edifícios públicos, um valor razoável andarà à volta dos dez anos.

De seguida apresentam-se os custos estimados para a situação de referência e para algumas das medidas de mitigação. Estes custos são apenas parciais, englobando os componentes que podem ser alterados em cada medida de mitigação. Os valores são obtidos de catálogos da Sytemair (ventiladores), da Roca (caldeira mural e de condensação) e também por informação disponibilizada pela Efacec. O acréscimo de custos é sempre medido em relação à situação de referência.

A potência máxima de aquecimento que ocorre durante o ano é de 34 kW e a de arrefecimento é de 14 kW. Consideram-se estes valores como as potências de projecto para os sistemas de aquecimento e de arrefecimento.

- **Situação de referência**
 - Caldeira mural (modelo Bios 28F da Roca): 1 600€;
 - Chiller (informação da Efacec): 3 500€
 - Ventilador (Mod. MVEC DA10/10 da Systemair): 1 600€
- **Caldeira de condensação** (modelo Bios 28F da Roca): 2 400€;
 - ✓ Acréscimo: $2\,400 - 1\,600 = 800\text{€}$
- **Bomba de calor reversível** (informação da Efacec): 12 000€
 - ✓ Acréscimo: $12\,000 - 3\,500 - 1\,600 = 6\,900\text{€}$

- **Recuperação de calor com infiltrações de 0,7 RPH**

- Permutador de fluxos cruzados (informação da Efacec): 5 000 €
- Ventilador adicional: 1 600€
- ✓ Acréscimo: **6 600€**

- **Recuperação de calor com infiltrações reduzidas (0,1 RPH)**

A redução das infiltrações implica uma alteração na envolvente de maneira a aumentar fortemente a sua estanquicidade. Os envidraçados são os elementos da envolvente com maior influência no grau das infiltrações e por tal importa que apresentem elevada estanquicidade

A substituição por janelas de vidro duplo, corte térmico e elevada impermeabilidade ao ar, segundo informação de serralharia (Alumineiva), tem um custo mínimo que andarà à volta de 80€/m². Considerando treze janelas (de 4 m²) resulta cerca de 4 200€. No entanto, considerando a melhoramento térmico que a janela introduz, é quantificado neste ponto apenas metade deste valor. O restante é contabilizado de seguida, como parte da melhoria da envolvente.

Somando com o valor anterior, referente à recuperação, tem-se:

- ✓ Acréscimo: **8 700€**

- **Melhoria da envolvente (aumento do isolamento)**

A diminuição do coeficiente de transmissão das paredes exteriores e da cobertura faz-se com a utilização de poliestireno expandido com trinta centímetros (pelo exterior). A publicação do LNEC “Informação sobre custos” (Manso, A. et al., 2004) aponta valores da ordem dos 20€/m² para esta operação. Deve-se referir que este valor é para construção de raiz e não para remodelação, como é o caso, pelo que provavelmente este valor peca por defeito.

Para uma área de parede exterior e cobertura de aproximadamente 650 m² resulta um custo total de 13 000€. Adicionando 2 100€ correspondentes às novas janelas resulta:

- ✓ Acréscimo: **15 100€**

- **Maior eficiência dos ventiladores (redução de SFP, “Specific Fan Power”)**

Como atrás referido a obtenção de um valor do SFP reduzido depende da optimização de um conjunto alargado de factores, nomeadamente as perdas de carga nas condutas, a eficiência no ventilador, a eficiência do motor de accionamento, do acoplamento, etc. É portanto difícil mensurar com algum rigor o custo associado a esta medida.

- **Eficiência da ventilação de 100%**

Também para esta situação se torna difícil obter dados conclusivos, uma vez é necessário ter definidos tanto o sistema de referência (“mistura”) que garante uma eficiência de ventilação de 80%, como o sistema para uma eficiência de 100% (“displacement”).

No entanto, considerando a tipologia, as poupanças relativamente diminutas e a utilização ainda restrita deste tipo de sistemas, pode-se concluir que em princípio esta alteração não tem viabilidade.

Tabela 27 - Períodos de "pay-back" de algumas medidas de mitigação

	Acréscimo [€]	Poupança [€/ano]	"Pay-Back" [anos]
Caldeira de Condensação	800	116	7
Recuperação c/ Infiltrações 0,7 RPH	6 600	121	54
Melhoria Envolvente	15 100	160	94
Recuperação c/ Infiltrações 0,1 RPH	8 700	172	51
Bomba de Calor	6 900	387	18

À primeira vista a única medida que garante um período de "pay-back" razoável é a caldeira de condensação, ironicamente a medida que proporciona menores poupanças anuais. A bomba de calor, devido ao maior investimento inicial, tem um período de retorno já não aceitável.

As outras três medidas estudadas revelam períodos de retorno excessivos, apesar de serem aceitáveis, para medidas como a melhoria de envolvente e o aumento da estanquicidade, períodos superiores a dez anos. De qualquer forma pode-se concluir que estas medidas são inviáveis, pelo menos quando consideradas isoladamente.

2.2. Pavilhão de Escola Secundária

2.2.1. Apresentação

A Escola seleccionada é um modelo típico da década de 80, constituída por vários pavilhões de aulas, um polivalente e o gimnodesportivo. Para este trabalho foi modelado um pavilhão de aulas da Escola:



Figura 18 – Foto de um pavilhão igual ao da tipologia estudada (tirada no sentido NW)

O pavilhão tem três pisos idênticos, com salas nos quatro quadrantes e um átrio central amplo, delimitado a vermelho na figura seguinte (planta), com uma clarabóia (delimitado a azul) onde existem as escadas e os corredores de acesso às salas de aulas. Estas têm vãos envidraçados de métrica regular numa das fachadas (a verde na planta). A fachada envidraçada que se vê na foto está orientada a Sul.

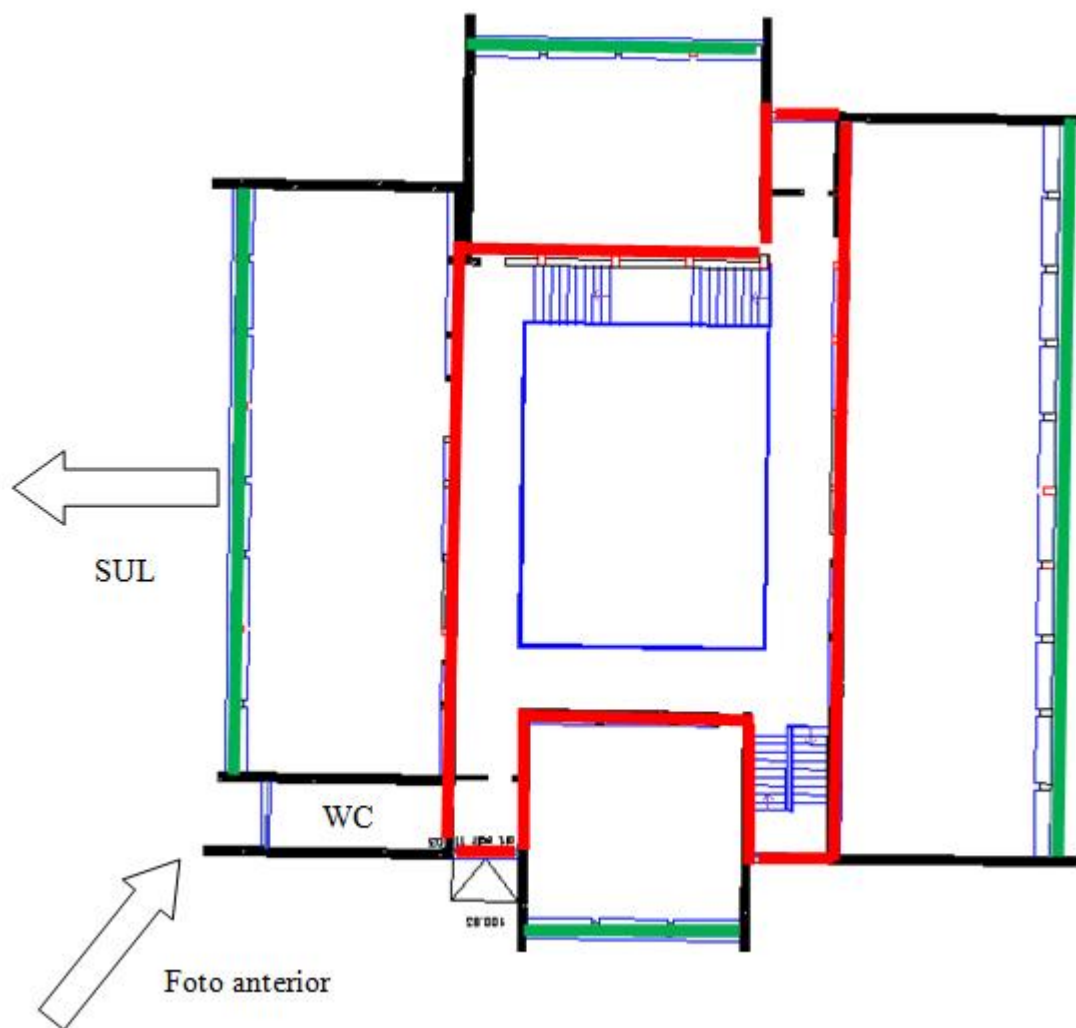


Figura 19 – Planta do rés-do-chão do pavilhão

Áreas

A Este e Oeste só existe uma sala por piso, ao contrário do que acontece a Norte e a Sul em que normalmente existem mais, divididas por paredes de alvenaria. No entanto, dadas as semelhanças de orientação, ganhos internos e envolvente transparente, podem ser consideradas termicamente iguais e tratadas com uma única zona térmica no modelo, ou seja, consideram-se quatro salas por piso e um espaço para WC. A área útil e a envidraçada resultam:

Tabela 28 – Área útil e envidraçada

Zonas	Área útil	Área vãos envidraçados
	[m ²]	[m ²]
Sul	161 × 3	35 × 3
Este	60 × 3	13 × 3
Norte	200 × 3	43 × 3
Oeste	79 × 3	18 × 3
WC	13 × 3	-
Átrio	231	-
Total	1770	327

O pé direito das salas do rés-do-chão e piso 1 é constante e igual a 2,95m. No piso 2, as salas a Sul e Norte têm um pé direito médio de 3,5 m, as a Este e Oeste 4,1 m. O átrio central tem um pé direito de 10 m.

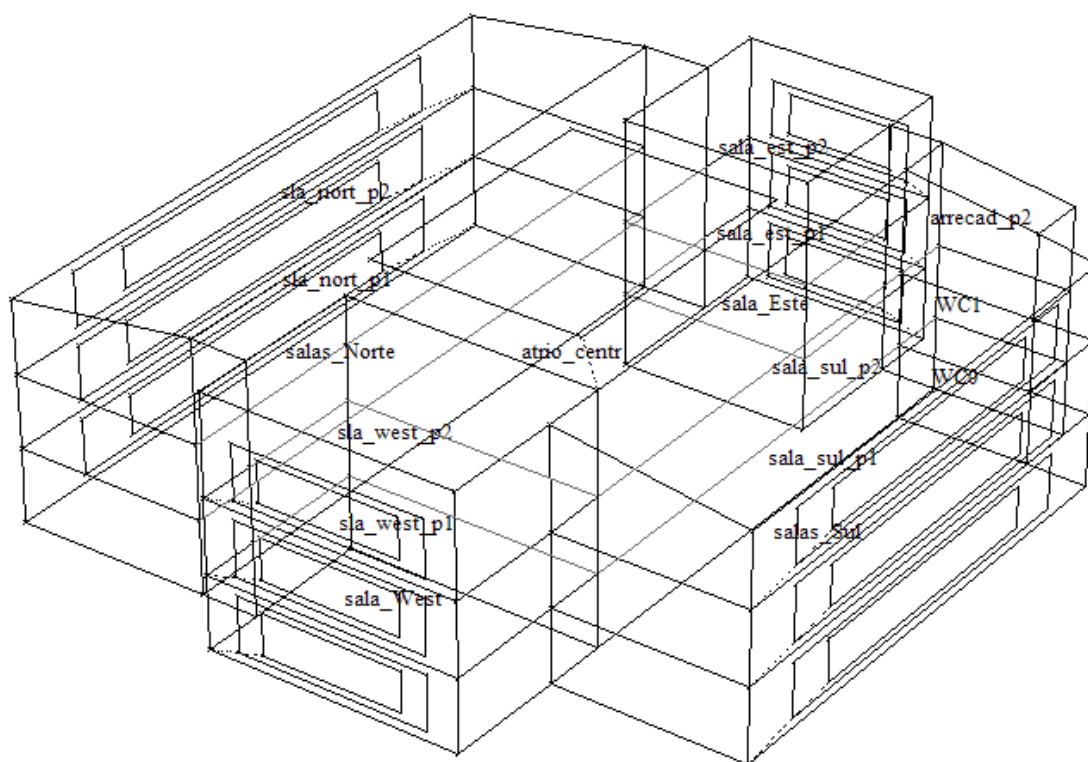


Figura 20 – Geometria utilizada no ESP-r

2.2.2. Caracterização térmica da envolvente

Envolvente opaca

As soluções construtivas são semelhantes às utilizadas na tipologia anterior (parede exterior, interior e laje de chão e tecto). Existe uma pequena diferença nas paredes interiores, que têm maior espessura, com um pano de alvenaria de 25 cm, alterando-se assim o valor do coeficiente de transmissão U e da inércia do edifício (aumenta), em relação ao caso anterior. No entanto, porque são paredes interiores, que separam zonas climatizadas, a variação do valor do U é desprezável.

Envolvente transparente: clarabóia e envidraçados

A clarabóia existente no centro do átrio, com área de 99,2 m², foi, na ausência de melhor informação, modelada como um polímero de elevada densidade, de $U = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e com as seguintes propriedades ópticas (baixa transmissibilidade):

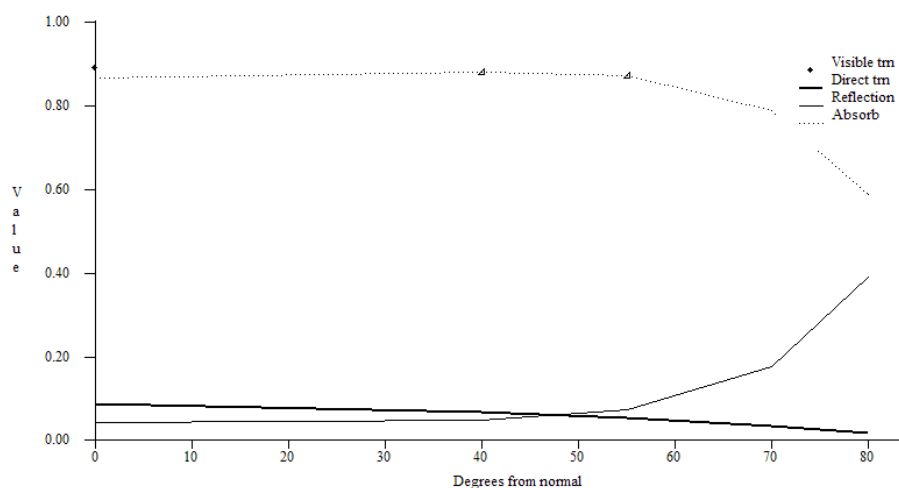


Figura 21-Propriedades ópticas da clarabóia do átrio central, em função do ângulo de incidência solar

As janelas são agora consideradas com caixilharia e quadrículas em alumínio, igualmente com vidro simples de 4 mm, possuindo cortina interior. O valor de U utilizado está previsto no ITE 50 e é, para caixilharia fixa sem sorte térmico, de $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. As propriedades ópticas são também iguais às do vidro simples da tipologia anterior (figura 6).

Também como anteriormente, apesar de os vãos apresentarem cortina interior, só se considera a existência de sombreamento pelo vão do envidraçado e procede-se da mesma forma para calcular a área “útil” de vidro, com a pequena diferença de que, para caixilharia em alumínio, o RSECE prevê uma fracção envidraçada de 60%.

A não consideração de sombreamento é, nesta tipologia mais que na anterior, um pouco extrema. No entanto, à semelhança do que aconteceu na outra situação, serão apresentados resultados correspondentes a soluções com menor transmissão directa de radiação, de maneira a melhor perceber a “sensibilidade” do valor das necessidades de aquecimento e arrefecimento a esta questão, uma vez que é impossível modelar o comportamento na situação real.

2.2.2.1. Pontes térmicas

As pontes térmicas a considerar são apenas lineares, pelas mesmas razões anteriores. Neste caso as situações consideradas foram novamente as tabelas no RCCTE:

Tabela 29 – Coeficientes de transmissão e desenvolvimento linear das pontes térmicas consideradas

Ligação:	Ψ [W/m.°C]	B [m]	Isolamento:
Fachada com pavimentos térreos	0,50	115	Sem isolamento
Fachada com pavimentos intermédios	0,50	460	Sem isolamento
Fachada com cobertura	0,50	115	Sem isolamento
Entre duas paredes verticais	0,50	72	Sem isolamento
Fachada com padieira ou peitoril	0,20	336	Sem contactar com a caixilharia
Elementos em contacto com terreno $0,05 < z < 1,5$	1,5	115	Sem isolamento

As pontes térmicas anteriores totalizam 620 W/°C. Considerando a equação 1, o U e a área das paredes exteriores (815 m²), e procedendo como aí, tem-se um $U_{equiv} = 1,8$ W/(m².°C).

Ganhos internos

Ao contrário da situação de referência anterior, nesta tipologia serão sempre utilizados os perfis do RSECE. Os valores dos ganhos internos são iguais aos utilizados no ponto 2.1.11 já que, no âmbito regulamentar, a Escola Primária e Secundária têm o mesmo tratamento.

Os ganhos internos podem totalizar, no máximo, 25,5 W/m².

Taxa de renovação horária e eficiência

A taxa de renovação horária devida à ventilação natural continua a considerar-se de 0,6 RPH e a eficiência da ventilação mecânica igual a 80%.

2.2.3. Resultados em “free-floating”

Tal como anteriormente, estes primeiros resultados servem para tentar obter uma imagem da situação actual vivida na Escola Secundária em estudo, dentro dos limites da modelação realizada e quantificar depois o aumento do desconforto com o aumento das taxas de ventilação (caudais do RSECE).

Os resultados apresentados serão as temperaturas de cada sala, por piso e quadrante.

Situação actual: 0,6 RPH

A utilização da taxa de 0,6 RPH já foi discutida anteriormente. Também para esta tipologia se optou por este valor como base e, apenas para o cálculo da percentagem de tempo em desconforto por “calor”, utilizou-se uma taxa de 2 RPH, que se aproxima mais da realidade que se vive no Verão.

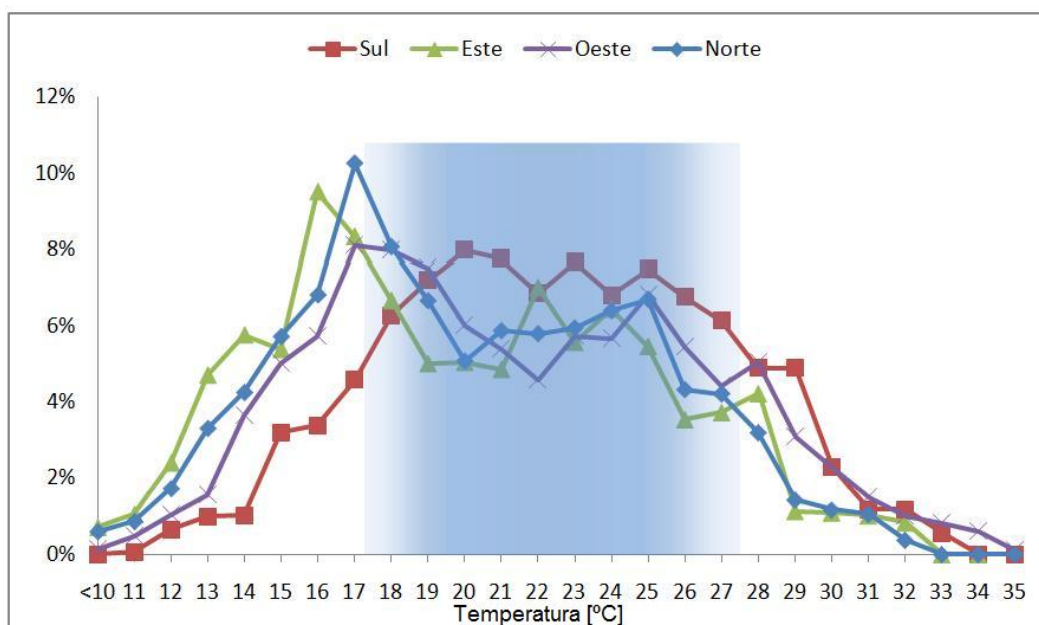


Figura 22 – Histograma da temperatura média das salas nos três pisos, por quadrante

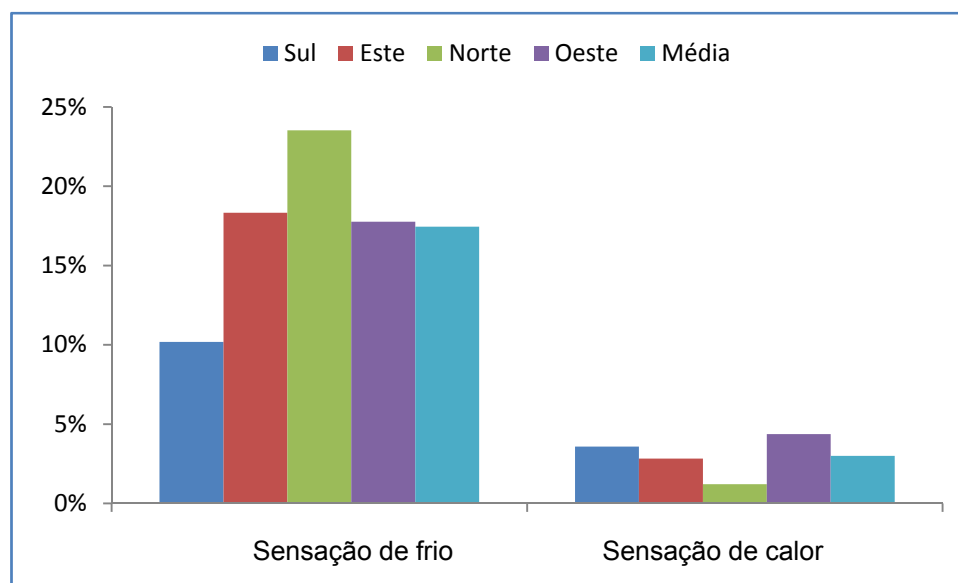


Figura 23 - Percentagem do tempo de ocupação com desconforto térmico, conforme a orientação e valor médio

Do gráfico anterior pode-se concluir pela existência de uma situação de desconforto na estação de aquecimento, principalmente sentido nas salas a Norte, ficando a média pelos 18% de tempo com desconforto. Na estação de arrefecimento a situação é bastante mais favorável, tendo em conta a utilização de uma taxa de ventilação maior, que acaba também por diminuir o efeito da orientação e do factor de forma, uniformizando os resultados, com o desconforto a situar-se em volta dos 3%.

Importa ainda referir que nesta tipologia se consideram períodos de ocupação de doze horas, o que, de certa forma, pode diluir os valores de tempo com desconforto.

Aumento da taxa de ventilação - caudais do RSECE

A taxa depende agora do número de pessoas em cada sala, em função da densidade de ocupação que o regulamento preconiza. Note-se que o caudal é definido para uma ocupação de 100% e é usado durante todo o período de ocupação, mesmo quando a percentagem é menor.

Tendo em conta este valor, o caudal mínimo por pessoa e a eficiência de ventilação, chega-se a uma taxa de 1,3 RPH, para as salas com pé direito de 2,95 m (1º e 2º pisos) e ligeiramente menor para as do 3º piso, pois têm um pé direito médio maior. No átrio a taxa é de 0,38 RPH. No conjunto do edifício são necessários 6500 m³/h.

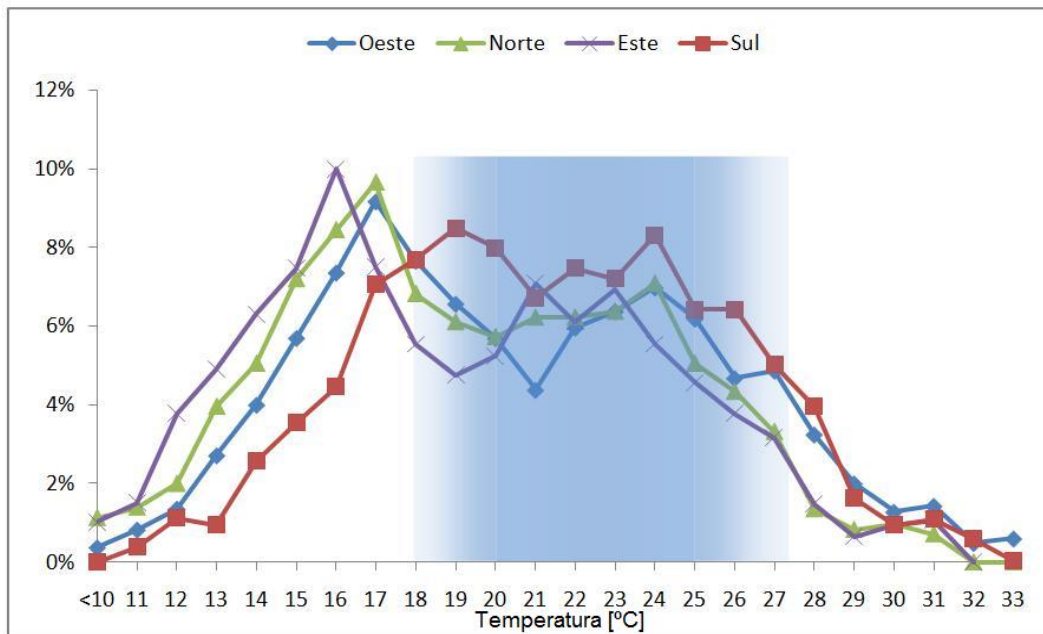


Figura 24 – Histograma da temperatura média das salas nos três pisos, por quadrante

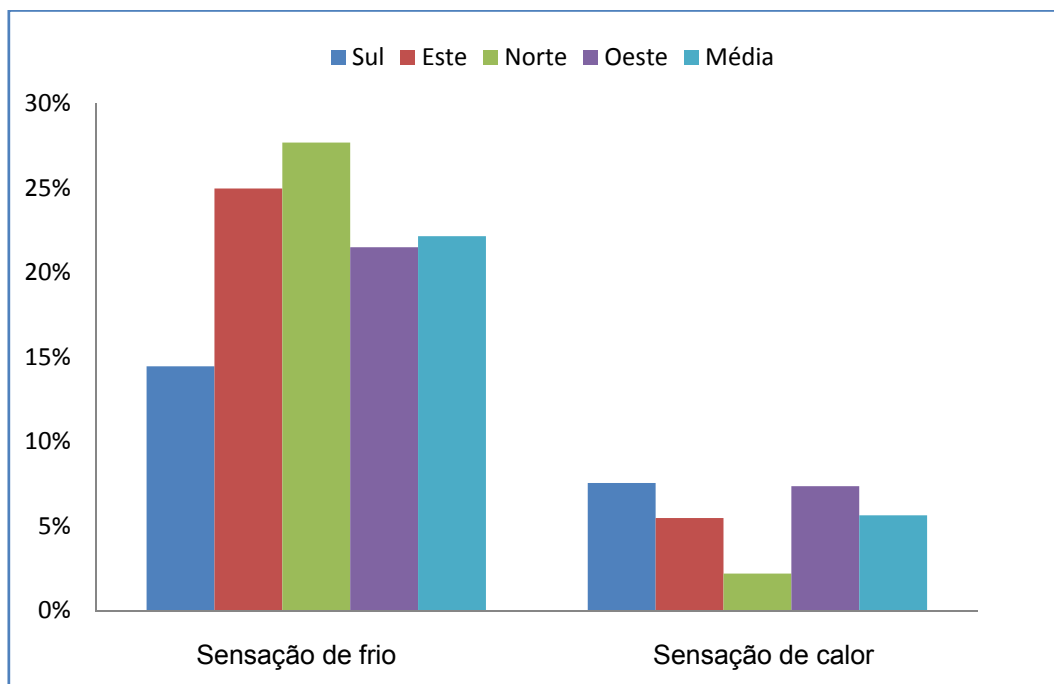


Figura 25 – Percentagem do tempo de ocupação com desconforto térmico, conforme a orientação

Comparando os resultados para as duas situações anteriores:

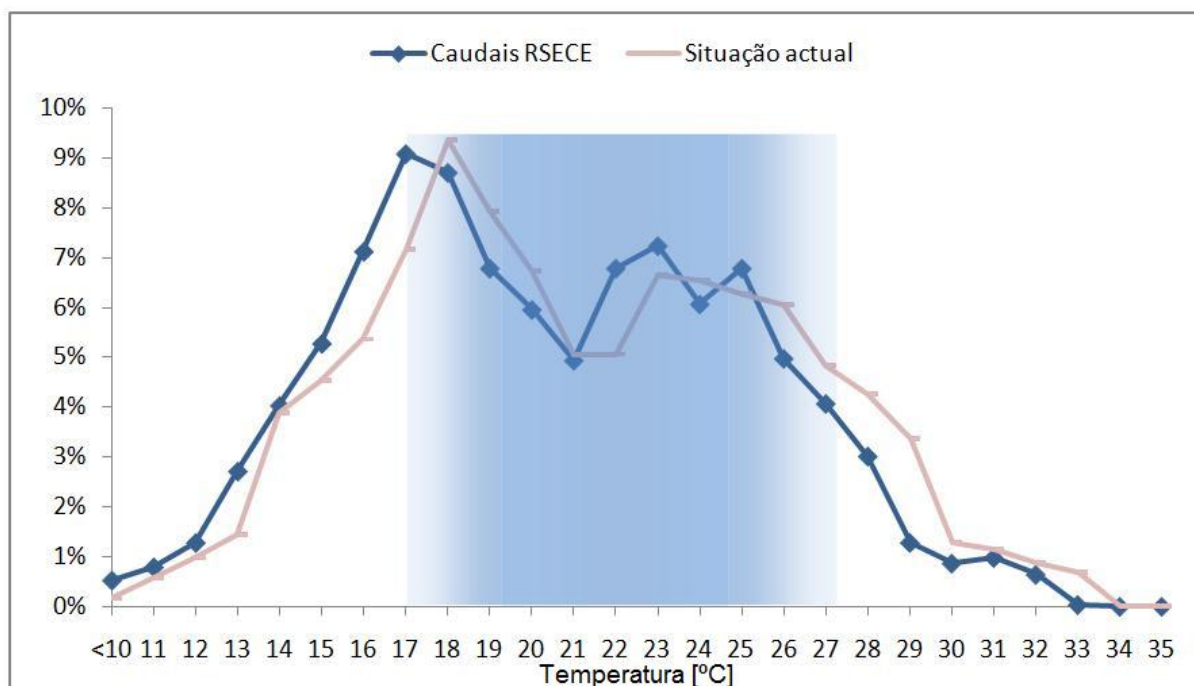


Figura 26 – Comparação da temperatura média de todas as salas, com os caudais actuais e do RSECE

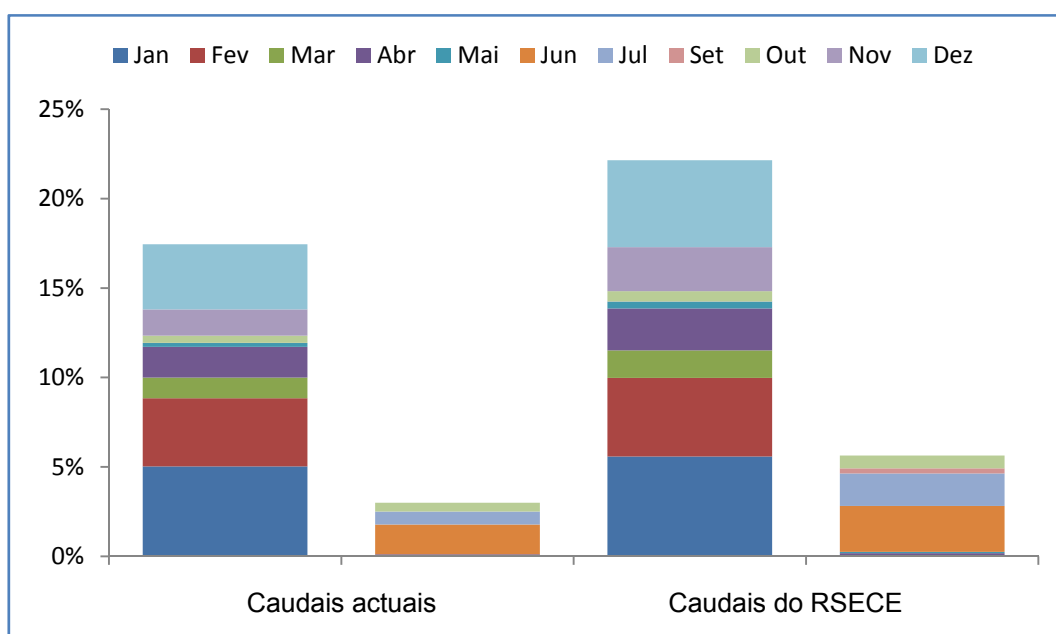


Figura 27 – Contribuições médias mensais para a situação actual e com os caudais do RSECE

Com o aumento da taxa de ventilação tem-se um aumento do desconforto na estação de aquecimento, para cerca de 22% do tempo de ocupação. Também o desconforto por “calor” aumenta, já que a taxa é menor do que a considerada para a situação “actual”. Este ponto levanta a questão da veracidade do valor de 2 RPH e do potencial de utilização de “free-cooling”.

Por fim a conclusão é idêntica à obtida para a Escola Primária: a situação actual da Escola é de algum desconforto, sobretudo na estação de aquecimento, que aumenta com a imposição dos caudais regulamentares, para níveis que praticamente exigem a utilização de um sistema de climatização, pelo menos para o aquecimento. A opção por um sistema para arrefecimento continua a não ser imediata. Os valores de desconforto são bastante baixos mas, como já referiu, a consideração de períodos longos de ocupação dilui os valores: por exemplo, se analisado o período das 9 às 17 horas, a média do tempo com desconforto sobe para 10%, chegando a quase 20% nas salas no quadrante Sul.

Assim, os passos seguintes consideram a utilização de um sistema de climatização para suprimir as necessidades de aquecimento e arrefecimento.

2.2.4. Resultados com ambiente climatizado

As zonas a climatizar são as doze salas (três em cada quadrante) e o átrio central que se pretendem agora mantidos entre 20 e 25°C. Tal como no primeiro caso de estudo, os resultados a obter nesta fase são as necessidades de aquecimento e arrefecimento, a energia consumida pelos ventiladores e o custo final com energia para manter estas condições.

Sistemas de climatização: Novamente, para suprir as necessidades de aquecimento considerou-se uma caldeira a gás natural com eficiência de 87%. Para as de arrefecimento um chiller com um COP de 3. Ambos os valores são dados como referência no RSECE

Leis de controlo: como anteriormente, seleccionou-se o comando “Basic Control” do ESP-r e considerado que o sistema está ligado das 8 às 20 horas (período de ocupação).

2.2.4.1. Situação actual: 0,6 RPH

São apresentados de seguida os resultados que se obteriam em caso de climatização da Escola na situação actual, ou seja, apenas com um caudal de infiltrações de 0,6 RPH (sem caudal insuflado).

Tabela 30 – Necessidades e custo com energia para a situação actual

Nec. Aquecimento [kWh/m ² .ano]	Nec. Arrefecimento [kWh/m ² .ano]	Custo Energia [€]
22,6	7,9	3201

2.2.4.2. Caudais RSECE

Face ao caso anterior, há a acrescentar a insuflação de ar exterior, que impõe custos com a energia dos ventiladores e com o aquecimento/arrefecimento desse mesmo ar. Os resultados obtidos são a referência para esta tipologia.

Potência dos ventiladores: Novamente se utiliza um valor de SFP (“Specific Fan Power”) de 0,5 W/(m³.h). Para um caudal de 6500 m³/h resulta uma potência de 3,25 kW. O período de funcionamento é coincidente com a ocupação, ou seja, doze horas diárias.

Tabela 31 – Matriz para a situação de referência da Escola Secundária

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	14285	0	16420	0	897	1412	0	260	1672
Fev	9423	1	10831	0	780	931	0	226	1158
Mar	5486	4	6305	1	858	542	0	249	791
Abr	2774	353	3189	118	819	274	34	238	546
Mai	673	343	774	114	897	67	33	260	360
Jun	0	5552	0	1851	819	0	537	238	774
Jul	0	5820	0	1940	858	0	563	249	811
Set	1	613	1	204	390	0	59	113	172
Out	1134	795	1304	265	897	112	77	260	449
Nov	7318	2	8411	1	858	723	0	249	972
Dez	8346	0	9594	0	546	825	0	158	983
Total	49441	13483	56829	4494	8619	4887	1303	2500	8690

Tabela 32 – Necessidade aquecimento e arrefecimento divididas pela área (1770 m²)

Nec. Aquecimento [kWh/m ² .ano]	Nec. Arrefecimento [kWh/m ² .ano]
27,9	7,6

Tabela 33 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
3296	514	985	4795

A diferença nos custos entre a situação actual e com os caudais é de 1594€, cerca de 50%. O aumento, ainda que considerável, é (em percentagem) bastante inferior ao verificado na Primária. A razão prende-se com as taxas de renovação: enquanto na Primária o salto é de 0,6 para 3,3 RPH, na Secundária passa-se de 0,6 para apenas 1,3 RPH (dos caudais actuais, para os do RSECE).

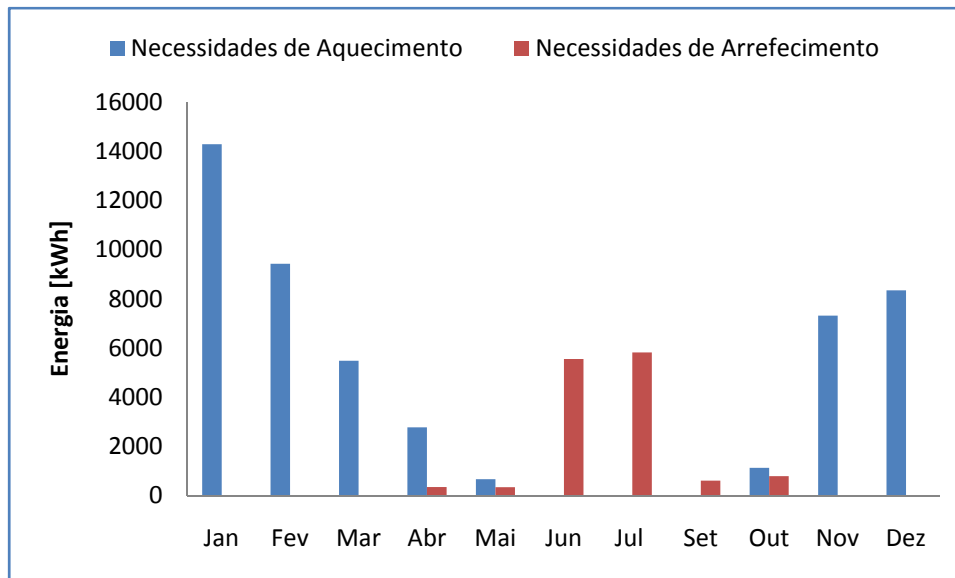


Figura 28 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento mensais

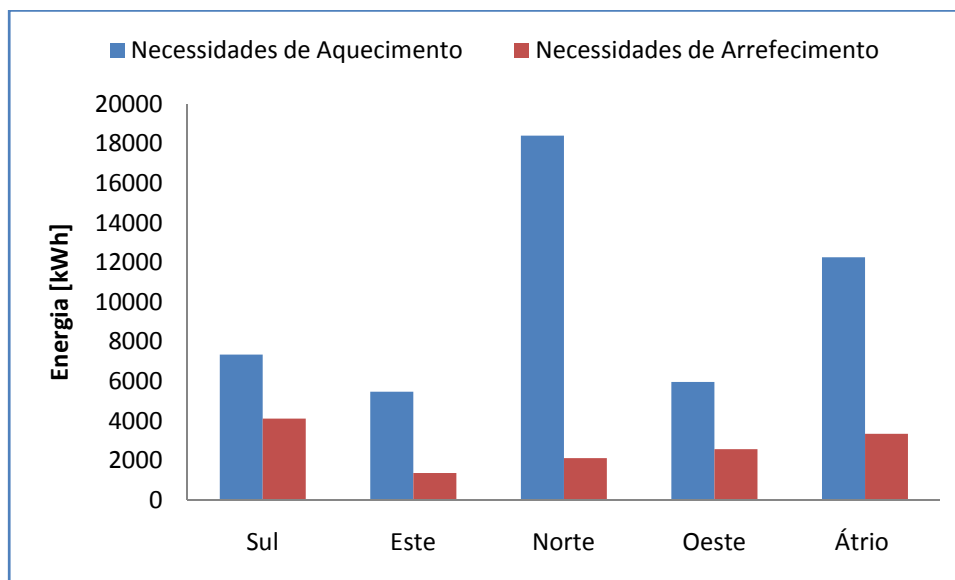


Figura 29 – Necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada quadrante e átrio central

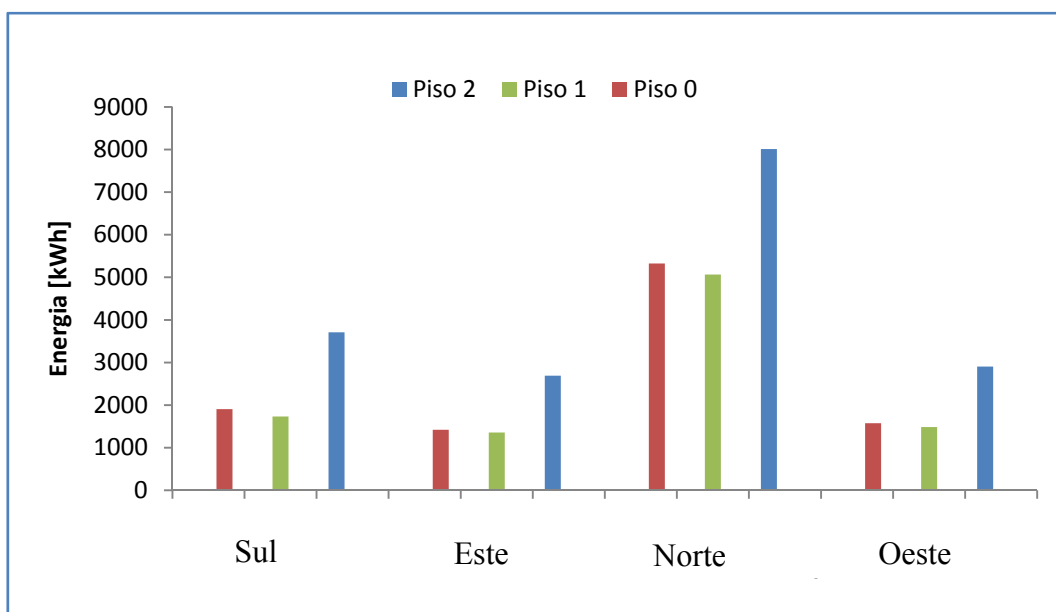


Figura 30 – Necessidades de aquecimento, por piso e quadrante

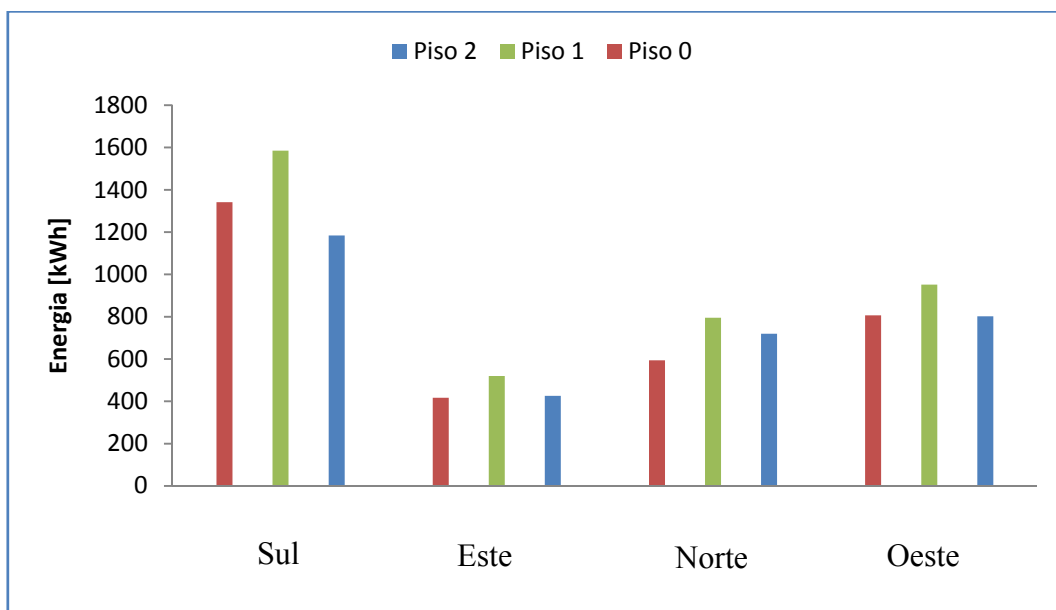


Figura 31 – Necessidades de arrefecimento, por piso e quadrante

Como referido aquando da definição das propriedades ópticas dos envidraçados, não se considera qualquer tipo de sombreamento (exterior ou interior). De qualquer forma, importa referir que as necessidades de arrefecimento cairiam dos 13483 para 10137 kWh, ou seja, uma redução de cerca de 30% com a utilização de uma solução para os envidraçados que traduzisse uma maior sombreamento, como no caso na Escola Primária (figura 15).

2.2.5. Mitigação

a) Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,7 RPH

Comparando com a tipologia anterior, tem-se agora uma potência dos ventiladores maior, em virtude do maior caudal a insuflar:

Potência de ventilação: Com o SFP de $2 \times 0,5 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ e o caudal de $6500 \text{ m}^3/\text{h}$, resulta uma potência de 6,5 kW.

Anteriormente, os meses seleccionados para a existência de recuperação de calor foram de Novembro a Março, inclusive. No entanto, nesta tipologia as necessidades de aquecimento por metro quadrado são menores e o período de ocupação maior (mais energia consumida pelos ventiladores), o que pode pôr em causa a viabilidade da recuperação nos mesmos meses. Também o aumento dos custos com a energia dos ventiladores se faz sentir mais fortemente nesta tipologia, devido ao maior caudal.

No gráfico seguinte faz-se uma comparação de custos entre a situação de referência para a Escola Secundária (sem recuperação) e a existência de recuperação de calor:

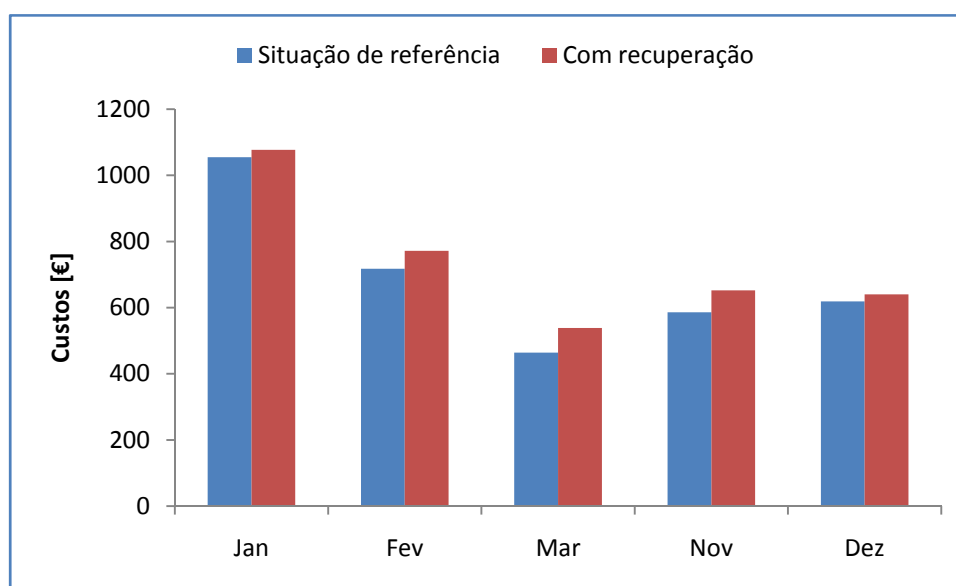


Figura 32 - Comparação de custos energia final

A conclusão imediata é que em nenhum mês compensa a utilização de recuperação de calor: o abaixamento das necessidades de aquecimento não é muito, penalizado fortemente pelo efeito negativo das infiltrações, acompanhado pelo aumento significativo da energia consumida com a ventilação.

b) Recuperação de calor com eficiência de 80% e infiltrações de 0,1 RPH

A única diferença para a anterior consiste na utilização de uma taxa de infiltrações menor. Analisando os custos como anteriormente:

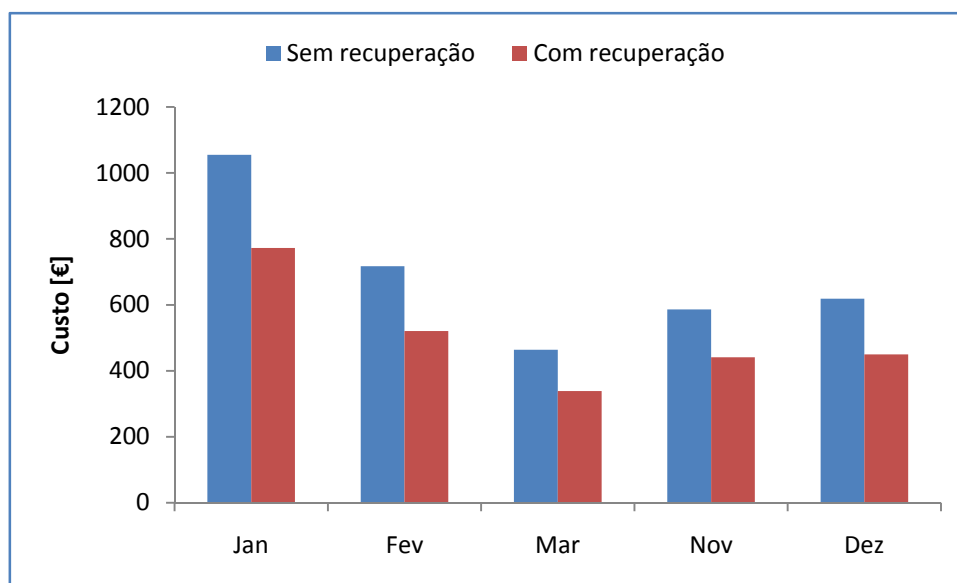


Figura 33 - Comparação de custos energia final

Ao contrário de trás, com esta situação a recuperação de calor permite poupanças em todos os meses do período considerado. De notar que fora dos meses com recuperação os dados se mantêm como na situação de referência para esta tipologia (2.2.4):

Tabela 34 – Matriz de dados para a situação de recuperação com infiltrações reduzidas

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	8511	0	9782	0	1716	841	0	498	1339
Fev	5134	0	5902	0	1560	508	0	452	960
Mar	2140	2	2459	1	1716	211	0	498	709
Abr	<i>Valores iguais aos da tabela 30: situação de referência</i>								
Mai									
Jun									
Jul									
Set									
Out									
Nov	3672	1	4220	0	1716	363	0	498	861
Dez	4874	0	5602	0	1092	482	0	317	798
Total	28691	13483	32979	4493	12558	2836	1303	3642	7781

Tabela 35 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
1913	514	1435	3862

c) Melhoria de envolvente

A melhoria da envolvente traduz-se numa utilização de soluções construtivas de elevada qualidade, que permitam alcançar menores valores de coeficiente de transmissão e a redução da severidade das situações de ponte térmica.

Considerou-se para tal a existência de isolamento pelo exterior de forma a obter um coeficiente de transmissão de $0,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para as paredes exteriores e para a cobertura e os seguintes valores para os coeficientes de perdas lineares nas pontes térmicas:

Tabela 36 - Coeficientes de transmissão das pontes térmicas com soluções de isolamento melhoradas

Ligação:	Ψ [W/m. $^\circ\text{C}$]	B [m]	Isolamento:
Fachada com pavimentos térreos $d > 60 \text{ cm}$; $z = < 40 \text{ cm}$	0,15	115	Exterior
Fachada com pavimentos intermédios $15 \text{ cm} < e_m < 32 \text{ cm}$	0,10	460	Exterior
Fachada com cobertura $e_p = 24 \text{ cm}$;	0,50	115	Contínuo Exterior
Entre duas paredes verticais $e_m > 22 \text{ cm}$;	0,15	72	Exterior
Fachada com padieira ou peitoril	0	336	Exterior em contacto com caixilharia
Elementos em contacto com terreno $0,05 < z < 1,5$	1,2	115	Perimetral

O somatório das contribuições anteriores resulta em $270 \text{ W/}^\circ\text{C}$, donde se obtém, considerando a mesma metodologia de trás, um $U_{\text{equi}} = 0,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

A par com a melhoria da envolvente opaca também se considerou uma solução para a envolvente transparente com um menor coeficiente de transmissão térmica, escolhendo-se para tal uma solução com vidro duplo, e caixilharia com corte térmico e lâmina de ar de $0,6 \text{ mm}$, baixando assim o valor de U de 6 para $3,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, valor apontado pelo ITE 50 para este tipo de solução. No entanto, comparando as propriedades ópticas do vidro simples anteriormente utilizado e este vidro duplo (figuras 6 e 12), verifica-se que a utilização deste tem como consequência também a diminuição da radiação transmitida.

Para a clarabóia central do átrio, diminui-se o coeficiente de transmissão em 50% , para $2,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Tabela 37 – Comparação do coeficiente de transmissão antes e depois da melhoria da envolvente opaca e transparente

	Área [m ²]	Solução anterior [W/m ² .°C]	Solução melhorada [W/m ² .°C]
Parede Exterior	815	1,8	0,9
Envidraçados	324	5,9	3,7
Laje da cobertura	631	1,5	0,6
Clarabóia	99	5,0	2,5

Como anteriormente, comparando os valores do coeficiente de transmissão para ambas as soluções (com e sem isolamento), obtém-se um U ponderado de 2,6 ou 1,4 respectivamente, para as soluções anteriores e para as soluções melhoradas, ou seja, uma redução de quase 50% do coeficiente de transmissão devido à utilização de soluções com maior isolamento.

Tabela 38 – Matriz para a situação de envolvente melhorada

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	13620	1	15655	0	897	1346	0	260	1606
Fev	3315	49	3811	16	780	328	5	226	559
Mar	433	117	497	39	858	43	11	249	303
Abr	1253	1031	1440	344	819	124	100	238	461
Mai	121	1597	140	532	897	12	154	260	426
Jun	0	7451	0	2484	819	0	720	238	958
Jul	0	8354	0	2785	858	0	808	249	1056
Set	0	1198	0	399	390	0	116	113	229
Out	382	1695	439	565	897	38	164	260	462
Nov	4151	55	4772	18	858	410	5	249	665
Dez	5375	31	6178	10	546	531	3	158	693
Total	28650	21580	32931	7193	8619	2832	2086	2500	7417

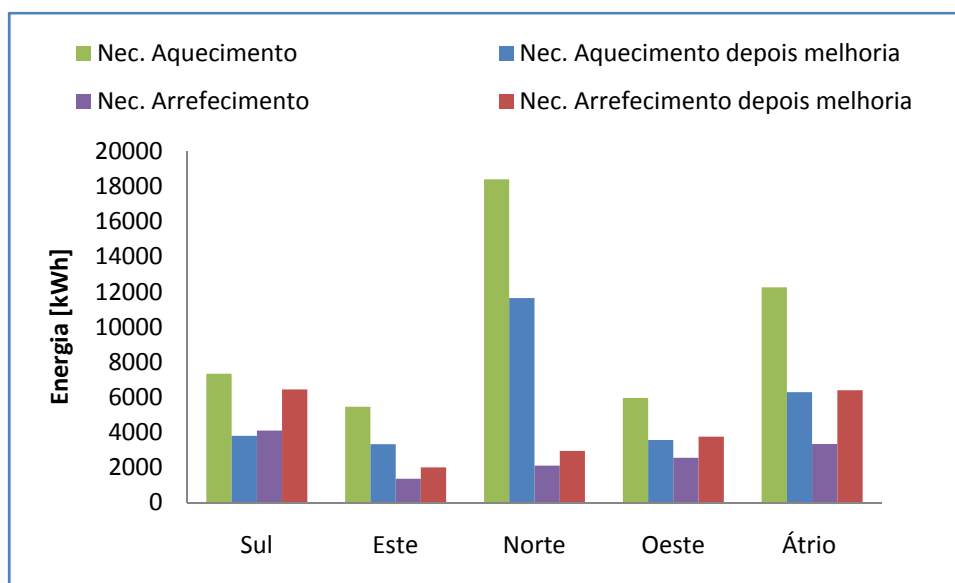


Figura 34 – Impactes da melhoria da envolvente por quadrante

Tabela 39 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
1910	822	985	3717

d) Aumento da eficiência de ventilação: 100% (valor ideal)

A opção por um sistema de insuflação de ar nos espaços que garante uma eficiência de ventilação de 100% tem duas vantagens, directamente resultantes da diminuição do caudal: redução das necessidades de aquecimento e da energia dispendida com os ventiladores. Em contrapartida existe um ligeiro aumento das necessidades de arrefecimento.

Potência dos ventiladores: Com uma eficiência de 100% o caudal a insuflar passa a ser de 5200 m³/h, de que resulta uma potência de 2,6 kW

Tabela 40 - Matriz energética para 100% de eficiência de ventilação

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	12733	0	14636	0	718	1259	0	208	1467
Fev	8363	1	9613	0	624	827	0	181	1008
Mar	4658	10	5354	3	686	460	1	199	660
Abr	2348	343	2699	114	655	232	33	190	455
Mai	513	312	590	104	718	51	30	208	289
Jun	0	5624	0	1875	655	0	544	190	734
Jul	0	5983	0	1994	686	0	578	199	777
Set	0	541	0	180	312	0	52	90	143
Out	936	807	1076	269	718	93	78	208	379
Nov	6353	5	7302	2	686	628	1	199	828
Dez	7412	0	8519	0	437	733	0	127	859
Total	43316	13626	49788	4542	6895	4282	1317	2000	7599

Tabela 41 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
2888	519	788	4195

e) Aumento da eficiência dos ventiladores (redução do SFP)

Como valor para soluções de elevada eficiência considerou-se $0,2 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$, de que resulta uma potência de $1,3 \text{ kW}$ (recorde-se que o caudal a insuflar são $6500 \text{ m}^3/\text{h}$).

Desta forma a energia requerida pelos ventiladores passa de 8619 para 3448 kWh e consequentemente os custos descem para 4204 € .

f) Utilização de sistemas de maior eficiência para suprir as necessidades de aquecimento

- **Caldeira de condensação com rendimento de 105% (base P.C.I.):** tem a vantagem de ser uma solução menos onerosa que a bomba de calor e continuar a utilizar o mesmo vector energético (gás natural), mas agora de forma mais eficiente, se compararmos com o rendimento de 87% da caldeira da situação de referência. Permite uma poupança anual de 565 € , ou seja, 12% dos custos operacionais;
- **Bomba de calor: COP = 4:** o maior investimento inicial é compensado pelo enorme salto na eficiência, mesmo considerando a utilização de um vector energético mais oneroso. Aplicada neste caso, permite uma poupança anual de 1883 € , ou seja, 39% dos custos operacionais.

g) Melhoria integrada

Por último analisa-se uma situação com as medidas anteriores, todas juntas. Tem o interesse de ver qual o custo mínimo (com estas medidas) da climatização do edifício e também para ajudar a analisar a influência de cada medida em conjunto, de potenciais sinergias ou por outro lado identificar medidas que fazem menos sentido juntas. As medidas a considerar são:

- Melhoria da envolvente;
- Eficiência de ventilação de 100%;
- Eficiência elevada dos ventiladores ($SPF^6 = 2 \times 0,2$ ou $0,2 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$);
- Bomba de calor, $COP = 4$;
- Recuperação com infiltrações de 0,1 RPH.

Existe recuperação no período de Novembro a Março, inclusive.

Tabela 42 - Matriz para a melhoria integrada

Mês	Necessidades [kWh]		Energia Final [kWh]			Energia Primária [kgep]			Total [kgep]
	Aquec/	Arref/	Aquec/	Arref/	Vent/	Aquec/	Arref/	Vent/	
Jan	4136	7	1034	0	574	89	0	166	255
Fev	2135	79	534	26	499	46	8	145	198
Mar	516	173	129	58	549	11	17	159	187
Abr	1053	1125	263	375	262	23	109	76	207
Mai	93	1701	23	567	287	2	164	83	250
Jun	0	7634	0	2545	262	0	738	76	814
Jul	0	8570	0	2857	275	0	828	80	908
Set	0	1352	0	451	125	0	131	36	167
Out	318	1849	79	616	287	7	179	83	269
Nov	1297	99	324	33	549	28	10	159	197
Dez	2240	56	560	19	349	48	5	101	155
Total	11789	22645	2947	7546	4019	253	2188	1165	3607

Tabela 43 – Custos anuais com a energia final, em euros [€]

Energia Aquecimento	Energia Arrefecimento	Energia Ventiladores	Custo Total
337	862	459	1659

⁶ Conforme exista ou não recuperação de calor (o valor duplica com a existência de recuperação)

2.2.6. Resumo dos resultados e classificação energética

Tabela 44 – Resumo dos resultados das simulações anteriores e classificação energética

	Necessidades Aquecimento [kWh/ano]	Necessidades Arrefecimento [kWh/ano]	Energia Ventilador [kWh]	Custos da Energia [€/ano]	Diferença [€/ano]	IEE	Classe
Situação Referência	49441	13483	8619	4795	-	10,9	B
Caldeira Condensação	Situação Referência	Situação Referência	Situação Referência	4230	565	10,6	
Maior eficiência Ventiladores	Situação Referência	Situação Referência	3448	4204	591	10,3	
Eficiência Ventilação 100%	43316	13626	6895	4195	600	10,5	
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,1 RPH	28691	Situação Referência	12558	3862	933	10,7	
Melhoria Envolvente	28650	21580	Situação Referência	3717	1078	10,7	
Bomba Calor	Situação Referência	Situação Referência	Situação Referência	2912	1883	10,4	A
Melhoria Integrada	11789	22645	4019	1659	3136	9,5	

Tabela 45 – Variações das necessidades de aquecimento e arrefecimento, energia dos ventiladores e dos custos da energia

	Necessidades Aquecimento [%]	Necessidades Arrefecimento [%]	Energia Ventilador [%]	Custo da Energia [%]
Maior eficiência Ventiladores	-	-	-60	-12
Eficiência Ventilação 100%	-12	+1	-20	-13
Caldeira Condensação	-	-	-	-12
Recuperação 80% c/ infiltrações 0,1 RPH	-42	-	+46	-19
Melhoria Envolvente	-42	+60	-	-22
Bomba Calor	-	-	-	-39
Melhoria Integrada	-76	+68	-53	-65

A melhoria integrada permite poupanças de 65% nos custos com energia, apesar da subida considerável das necessidades de arrefecimento, já que as medidas de mitigação não foram direccionadas a estas e algumas para as necessidades de aquecimento – melhoria da envolvente e aumento da eficiência da ventilação – tem como efeitos colaterais o aumento das necessidades de arrefecimento.

2.2.7. Análise económica simplista das medidas anteriores

Tal como anteriormente, de seguida apresentam-se os custos estimados para a situação de referência e para as respectivas medidas de mitigação. Os valores são obtidos das mesma fontes anteriores. A potência máxima de aquecimento que ocorre durante o ano é de 75 kW e a de arrefecimento é de 65 kW. Consideram-se estes valores como as potências de projecto para os sistemas seguintes:

- **Situação de referência**
 - Caldeira mural (modelo G1000 da Roca): 2 500€;
 - Chiller (informação da Efacec): 12 500€;
 - Ventilador (Mod. MVEC DA15/15 da Systemair): 2 300€.

- **Caldeira de condensação (modelo Bios 85F da Roca): 48 000€;**
 - ✓ Acréscimo: $4\,800 - 2\,500 = 2\,300$ €.

- **Bomba de calor reversível (informação da Efacec): 23 000€**
 - ✓ Acréscimo: $23\,000 - 12\,500 - 2\,500 = 8\,000$ €.

- **Recuperação de calor com infiltrações de 0,7 RPH**
 - Permutador de fluxos cruzados (informação da Efacec): 10 000 €;
 - Ventilador adicional: 2 300€.
 - ✓ Acréscimo: **12 300€.**

- **Recuperação de calor com infiltrações reduzidas (0,1 RPH)**

Neste ponto considera-se o mesmo custo utilizada na Escola Primária (80€/m²). O pavilhão tem 70 janelas com 4,3 m² de área, donde resulta um custo de 24 000€.

Considerando o melhoramento térmico que a janela introduz, é quantificado neste ponto apenas metade deste valor. O restante é contabilizado de seguida, como parte da melhoria da envolvente.

 - ✓ Acréscimo: **24 300€.**

- **Melhoria da envolvente (aumento do isolamento)**

A solução considerada é a mesma que anteriormente pelo que se mantêm os 20€/m². Para uma área de parede exterior e cobertura (apenas na zona das salas) de aproximadamente 1 300 m² resultam encargos de 26 000€.

Acrescentando ainda metade do valor do custo de melhoramento da caixilharia vem:

✓ Acréscimo: **38 000€**.

- **Maior eficiência dos ventiladores e eficiência da ventilação 100%**

Mantêm-se as conclusões obtidas para a Escola Primária.

Tabela 46 – Períodos de “pay-back” para algumas das medidas de mitigação

	Acréscimo [€]	Poupança [€/ano]	Pay-back [anos]
Caldeira de Condensação	2300	565	4,1
Recuperação c/ Infiltrações 0,1 RPH	24 300	933	26
Melhoria Envolvente	38 000	1078	35
Bomba de Calor	8 000	1883	4,2

Para esta tipologia surgem como situações bastante atractivas a caldeira de condensação e a bomba de calor. Sendo soluções que rivalizam a opção deve ser pela bomba de calor pois as poupanças anuais são bastante maiores.

Novamente a solução de melhoria de envolvente e de recuperação se mostram inviáveis, mas com períodos de retorno menores do que na Escola Primária. Tendo em conta que, como se refere na Introdução, muitas Escolas vão ser sujeitas a obras de remodelação, estes custos podem ser diluídos no conjunto da empreitada.

Quanto à recuperação de calor seria de esperar que o resultado fosse mais favorável, já que é uma solução mais ou menos comum de mitigação (o próprio RSECE obriga à verificação da viabilidade económica da recuperação quando a potência rejeitada for superior a 80 kW).

Mesmo não se considerando os custos de redução das infiltrações (substituição janelas), o “pay-back” continuaria superior a 10 anos (cerca de 15). Como já se referiu a situação de recuperação é muito penalizada com o aumento significativo da energia de ventilação pelo que, como se observou para a situação de melhoria integrada, é indispensável otimizar a potência dos ventiladores.

3. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conclusões

A avaliação do desconforto térmico na estação de aquecimento mostra que ele existe nas duas tipologias analisadas, já nas actuais condições de baixas taxas de renovação e QAI, e que aumenta significativamente se, em resultado das auditorias de QAI, vierem a ser impostas as taxas de renovação constantes do RSECE. Na Escola Primária o tempo em desconforto chega a 50% e na Secundária a 22%. Estes resultados comprovam a existência de um problema grave de desconforto térmico que impõe a utilização de um sistema de climatização para aquecimento.

Na estação de arrefecimento, com os caudais regulamentares, o desconforto fica-se por valores bastante menores: 5% na Escola Primária e 6% na Secundária. Ao contrário de anteriormente a opção por um sistema que promova o arrefecimento não surge tão imediata. Viu-se ainda que a utilização de uma taxa de renovação de 2 RPH na Secundária diminui para cerca de 3% o tempo em desconforto no Verão. Também a não consideração de sombreamento maximiza estes números, como prova o cálculo das necessidades de arrefecimento com e sem sombreamento. Há ainda uma característica específica das Escolas Secundárias: a realização de Exames Nacionais, pelo menos nos moldes actuais, leva a que estas encerrem mais cedo, tendo assim um período de férias que começa na segunda quinzena de Junho, sendo a partir daí a ocupação pontual (para realização dos Exames). Ora é no mês de Junho e Julho que se concentrariam as maiores necessidades de arrefecimento (84% na situação de referência). Pode-se concluir o seguinte: na Escola Primária o problema é claramente de necessidade de aquecimento e é lícito dispensar um sistema para o arrefecimento; na Secundária a conclusão não é tão linear pois as necessidades de arrefecimento são relativamente maiores e a ocupação pode ser, ainda que pontualmente, bastante superior à considerada (turmas sobrelotadas). De qualquer forma, existem medidas passivas, como a garantia de sombreamento eficiente e aumento das taxas de ventilação (“free-cooling”) que podem permitir a dispensa de arrefecimento activo.

A análise das medidas de mitigação (dirigidas apenas às necessidades de aquecimento) mostra que, à excepção da recuperação de calor aplicada em conjunto com uma envolvente pouco estanque (0,7 RPH de infiltrações na Escola Secundária), todas elas permitem poupanças anuais. No entanto, a análise económica, ainda que simplista, indica que apenas a caldeira de condensação na Escola Primária e esta e a bomba de calor na Secundária têm períodos de retorno do capital inicial aceitáveis. Medidas como melhoria de envolvente ou diminuição das infiltrações representam investimentos demasiado elevados para serem realizadas isoladamente, apesar de permitirem poupanças significativas de energia. A recuperação de calor, apesar do grande potencial de redução das necessidades de aquecimento, também não tem viabilidade económica. O investimento adicional em equipamento e o aumento significativo da energia consumida para os ventiladores

contribuem para tal pelo que esta medida deve ser acompanhada por outras de optimização dirigidas à diminuição da potência dos ventiladores.

Sugestões para trabalhos futuros

Como já referido, um ponto em que se gostaria de ter ido mais longe é a análise económica das medidas de mitigação pelo que seria útil uma definição mais rigorosa dos custos adicionais com cada medida.

Quanto ao estudo de outras medidas de mitigação, sugere-se o estudo de medidas conducentes à optimização dos caudais insuflados, nomeadamente nas Escolas que, como as Secundárias, tem taxas reais de ocupação bastante irregulares. Esta questão revela-se bastante apelativa, tanto ao nível das poupanças energéticas (dos ventiladores e nas necessidades de aquecimento) como de uma garantia mais eficaz da QAI, por exemplo, com a utilização de sensores de CO₂ em conjunto com sistemas de volume de ar variável.

4. BIBLIOGRAFIA

- Aberg N, Sundell J, Eriksson B, Hesselmar B, Aberg B. (1996) *Prevalence of allergic diseases in schoolchildren in relation to family history, upper respiratory infections, and residential characteristics*. Allergy.
- ADENE (2008). *Perguntas & Respostas*. ADENE, Agência para a Energia.
- ASHRAE (2004). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Standard 55. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers
- ASHRAE (2005). *ASHRAE Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers.
- Beausoleil-Morrison, Ian (2000) *The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation*. University of Strathclyde, Glasgow UK.
- Hand, Jon W. (2006). *The ESP-r: cookbook*. Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland
- Leal, Vítor (2005) *Thermal and Energetic Analysis of a Naturally Ventilated Reversible Window*. FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Manso, Armando Costa (2004). *Informação sobre Custos: Fichas de Rendimento*, LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Norback, D.; Sestini, P.; Elfman, L.; Wieslander, G.; Sigsgaard, T.; Cancini, M.; Ciarlegio, G.; Annesi-Maesano, I.; Nystad, W.; Viegi, G. (2006). *Health effects of the School Environment (HESE): Indoor Environment in Primary Schools in Italy, France, Denmark, Norway and Sweden*. Healthy Buildings Conference.
- Pina dos Santos, Carlos; Matias, Luís (2006). *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*. LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- RCCTE (2006). *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*. Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril.
- RSECE (2006). *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*. Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, 2006.
- Silva, Gabriela; Martins, Anabela; Guedes, Joaquim; Samúdio, Maria; Fraga, Sílvia (2006). *Saúde Ambiental em Ambiente Escolar*. IDMEC, Instituto de Engenharia Mecânica

ANEXO A – Modelo Térmico do ESP-r

Neste anexo é feita uma apresentação breve da metodologia de simulação térmica do *software* utilizado neste trabalho: ESP-r. A informação que segue é retirada de Beausoleil-Morrison, Ian (2000):

A apresentação desenvolve-se em três fases: primeiramente é descrita a formulação de balanço térmico por volumes de controlo que o ESP-r utiliza, explicada em seguida para um caso simples num material da envolvente opaca. Finalmente é apresentada a modelação da transferência de calor por convecção para uma determinada zona.

Balanço térmico por volume de controlo com diferenças finitas

O ESP-r efectua a simulação térmica de um edifício aplicando formulação de diferenças finitas, baseada num balanço térmico e em volumes de controlo, de forma a representar todas as trocas de calor. Este processo envolve três passos fundamentais:

1. O edifício é discretizado de forma a representar volumes de ar (zonas como quartos, salas, etc.), construções opacas e transparentes (paredes, janelas, coberturas, pavimentos), interfaces sólido-fluido (como as superfícies internas e externas de paredes e janelas), e equipamentos de climatização (como caldeiras), a partir de nós, segundo o método das diferenças finitas. Nas construções opacas são colocados diversos nós para representar as diferentes camadas constituintes da solução construtiva. Na figura seguinte estão representados alguns nós;
2. Para cada nó é efectuado um balanço térmico, onde se consideram todas as trocas de calor, como representado na figura que segue;
3. Durante a simulação são repetidos os passos anteriores de forma a reformular e resolver as equações para cada “time-step”.

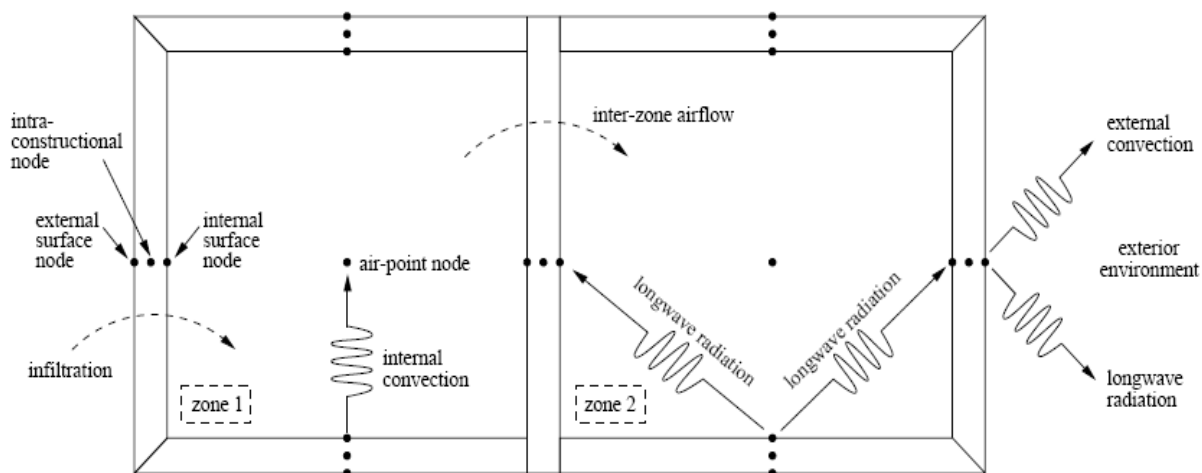


Figura 35 - Discretização de diferenças finitas e fluxos de calor nos nós internos

Balanco térmico para nós interiores numa solução construtiva opaca: a troca de calor no interior de construções opacas é complexa, podendo envolver numerosos modos de transferência de calor: condução sólida, condução gasosa, convecção dentro de materiais porosos, e radiação. O problema torna-se ainda mais complexo com a transferência de humidade, com a resistência de contacto entre os materiais e com os fluxos de calor multidimensionais em torno das estruturas. Embora o tratamento detalhado deste sistema complexo de transferência de calor seja possível, normalmente efectuam-se aproximações, reduzindo a transferência de calor através da envolvente opaca a um problema de condução monodimensional com propriedades termofísicas constantes.

Na figura seguinte é apresentado um exemplo de condução monodimensional em construção opaca, com várias camadas de materiais homogéneos. São utilizados três nós por cada camada: um para cada superfície de fronteira e o terceiro ao centro.

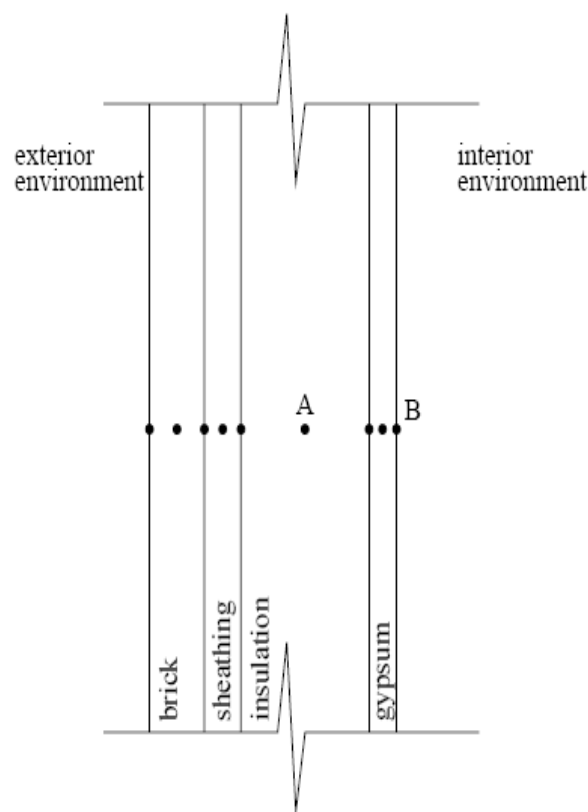


Figura 36 - Discretização dos nós para uma construção opaca

Para nós interiores, apenas sujeitos a condução, a variação da energia é igual à soma da condução e da geração de calor no volume de controlo (VC). O balanço surge como:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{calor armazenado} \\ \text{no VC} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{condução} \\ \text{para o VC} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{fonte calor} \\ \text{no interior do VC} \end{array} \right\}$$

Balanço térmico para nós de superfícies interiores: num volume de controlo para superfícies interiores, um dos nós de fronteira (que está em contacto com o ar) está sujeito a dois mecanismos adicionais de transferência de calor: a convecção e a radiação. A diferença para o balanço anterior consiste na contabilização destes dois mecanismos, do lado direito do balanço:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{calor armazenado} \\ \text{no VC} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{condução} \\ \text{no VC} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{fonte de calor} \\ \text{interior do VC} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{radiação} \\ \text{para o VC} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Convecção} \\ \text{para o VC} \end{array} \right\}$$

Balanço térmico para o ar interior: o mecanismo de transferência de calor entre o ar de uma divisão e a envolvente é a convecção. Deve-se acrescentar ainda a contribuição das infiltrações, pelo que o balanço vem:

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{calor} \\ \text{armazenado} \\ \text{no VC} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{convecção} \\ \text{para o VC} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{infiltrações} \\ \text{de outras} \\ \text{zonas} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{infiltrações} \\ \text{exteriores} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{fonte de calor} \\ \text{para o VC} \end{array} \right\}$$

ANEXO B – Perfis de ocupação, iluminação e equipamentos para Estabelecimentos de Ensino (RSECE)

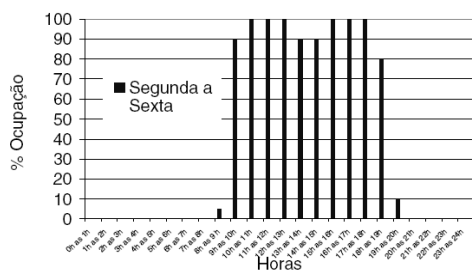
Estabelecimentos de ensino

Perfis variáveis de acordo com os valores das tabelas	
Salas aula e Espaços Comuns	Densidades
Ocupação	10 m ² /Ocupante
Iluminação	-----
Equipamento	5 W/m ²

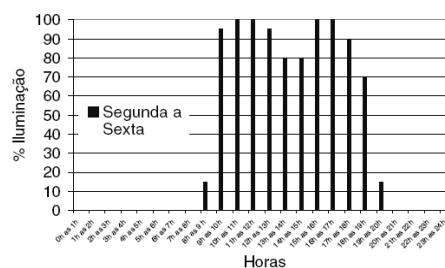
Perfis Constantes		
	Densidade	N.º Horas funcionamento
Iluminação Exterior	-----	5400
Cozinhas	Densidades	N.º Horas funcionamento
Iluminação	-----	1560
Equipamento	250 W/m ²	
Ventilação	8 W/m ²	

(*) Os perfis aplicam-se durante os períodos de 2 de Janeiro a 31 de Julho e de 15 de Setembro a 20 de Dezembro. Considerou-se a escola encerrada nos períodos de 1 de Agosto a 14 de Setembro e de 21 de Dezembro a 1 de Janeiro.

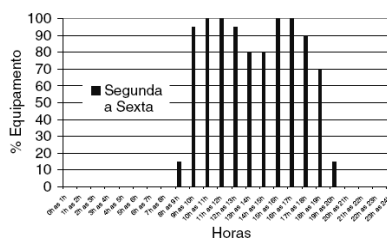
% de Ocupação			
horas	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h as 1h	0	0	0
1h as 2h	0	0	0
2h as 3h	0	0	0
3h as 4h	0	0	0
4h as 5h	0	0	0
5h as 6h	0	0	0
6h as 7h	0	0	0
7h as 8h	0	0	0
8h as 9h	5	0	0
9h as 10h	90	0	0
10h as 11h	100	0	0
11h as 12h	100	0	0
12h as 13h	100	0	0
13h as 14h	90	0	0
14h as 15h	90	0	0
15h as 16h	100	0	0
16h as 17h	100	0	0
17h as 18h	100	0	0
18h as 19h	80	0	0
19h as 20h	10	0	0
20h as 21h	0	0	0
21h as 22h	0	0	0
22h as 23h	0	0	0
23h as 24h	0	0	0



% de iluminação			
horas	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h as 1h	0	0	0
1h as 2h	0	0	0
2h as 3h	0	0	0
3h as 4h	0	0	0
4h as 5h	0	0	0
5h as 6h	0	0	0
6h as 7h	0	0	0
7h as 8h	0	0	0
8h as 9h	15	0	0
9h as 10h	95	0	0
10h as 11h	100	0	0
11h as 12h	100	0	0
12h as 13h	95	0	0
13h as 14h	80	0	0
14h as 15h	80	0	0
15h as 16h	100	0	0
16h as 17h	100	0	0
17h as 18h	90	0	0
18h as 19h	70	0	0
19h as 20h	15	0	0
20h as 21h	0	0	0
21h as 22h	0	0	0
22h as 23h	0	0	0
23h as 24h	0	0	0



% de equipamento			
horas	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h as 1h	0	0	0
1h as 2h	0	0	0
2h as 3h	0	0	0
3h as 4h	0	0	0
4h as 5h	0	0	0
5h as 6h	0	0	0
6h as 7h	0	0	0
7h as 8h	0	0	0
8h as 9h	15	0	0
9h as 10h	95	0	0
10h as 11h	100	0	0
11h as 12h	100	0	0
12h as 13h	95	0	0
13h as 14h	80	0	0
14h as 15h	80	0	0
15h as 16h	100	0	0
16h as 17h	100	0	0
17h as 18h	90	0	0
18h as 19h	70	0	0
19h as 20h	15	0	0
20h as 21h	0	0	0
21h as 22h	0	0	0
22h as 23h	0	0	0
23h as 24h	0	0	0



ANEXO C – Cálculo do IEE (RSECE) e valores para a etiquetagem energética

O IEE é calculado pela fórmula seguinte:

$$IEE = IEE_t + IEE_v + \frac{Q_{out}}{Ap}$$

em que:

IEE – indicador de eficiência energética (kgep/m².ano);

IEE_t - indicador de eficiência energética de aquecimento (kgep/m².ano);

IEE_v - indicador de eficiência energética de arrefecimento (kgep/m².ano);

Q_{out} - consumo de energia não ligado aos processos de aquecimento e arrefecimento (kgep/ano);

Ap - área útil de pavimento (m²).

Por sua vez: $IEE_t = \frac{Q_{aq}}{Ap} \times F_{CI}$ e $IEE_v = \frac{Q_{arr}}{Ap} \times F_{CV}$

em que:

Q_{aq} - consumo de energia de aquecimento (kgep/ano);

F_{CI} - factor de correcção do consumo de energia de aquecimento;

Q_{arr} - consumo de energia de arrefecimento (kgep/ano);

F_{CV} - factor de correcção do consumo de energia de arrefecimento:

$$F_{CI} = \frac{N_{I1}}{N_{I2}}$$

N_{I1} - necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência I1 (kWh/m².ano);

N_{I2} - necessidades máximas de aquecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizado o edifício (kWh/m².ano).

$$F_{CV} = \frac{N_{V1}}{N_{V2}}$$

N_{V1} - necessidades máximas de arrefecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, como se estivesse localizado na zona de referência I1-V1 (kWh/m².ano);

N_{V2} - necessidades máximas de arrefecimento permitidas pelo RCCTE, calculadas para o edifício em estudo, na zona onde está localizado o edifício (kWh/m².ano)

Etiquetagem energética

De acordo com o RSECE, para o cálculo da classe energética, o valor de referência do IEE para aquecimento e arrefecimento é de 15 kgep/m².ano. Existe igualmente um parâmetro S que se refere à soma dos consumos específicos para o aquecimento, arrefecimento e iluminação e que, para esta tipologia, toma o valor de 10 kgep/m².ano (ADENE, 2008). Os valores limite para cada classe energética são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 47 – Tabela para classificação para os Estabelecimentos de Ensinos

Classe				
A+			IEE <=	7.5
A	7.5	<	IEE <=	10.0
B	10.0	<	IEE <=	12.5
B-	12.5	<	IEE <=	15.0